



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ**

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**PROBLEMATIKA EXPERIMENTÁLNÍHO STANOVENÍ  
VLHKOSTI BETONU**

ISSUES OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF CONCRETE MOISTURE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Dominik Vaněk

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. MARTIN SEDLMAJER, Ph.D.

**BRNO 2021**



## VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Dominik Vaněk
Název	Problematika experimentálního stanovení vlhkosti betonu
Vedoucí práce	Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021
V Brně dne 30. 11. 2020	

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,  
dr.h.c.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

1. Mario Collepardi, Moderní beton, ČKAIT, 2009
2. Pierre-Claude Aitcin, Vysokohodnotný beton, ČKAIT, 2005
3. Peter A. Claisse, Transport Properties of Concrete, Measurements and Applications, Elsevier Ltd, Woodhead Publishing, 2014
4. Zdeněk P. Bažant, Milan Jirásek Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures, Springer Netherlands, 2018
5. Robert Cerny; Pavla Rovnanikova, Transport Processes in Concrete, CRC Press, 2002
6. Christopher Hall, William D. Hoff, Water Transport in Brick, Stone and Concrete, CRC Press, 2002
7. Normy, předpisy, tuzemské a zahraniční publikace v odborných časopisech

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Bakalářská práce bude věnována problematice vlhkosti v betonu z pohledu stanovení konkrétní vlhkosti v daném okamžiku. V práci by měla být popsána také distribuce vlhkosti v betonu. Především by měly být sumarizovány a popsány principy aktuálních dostupných metod, které se používají pro její stanovení. Existuje několik metod, které slouží k detekci aktuálního stavu vlhkosti betonu, ale jejich ověření bývá často problematické, protože není vždy možné stanovit obsah vlhkosti gravimetricky, například na betonech či konstrukcích in situ. Proto se předpokládá zaměření na nedestruktivní stanovení vlhkosti a popis relevance těchto metod.

V teoretické části by mělo být dále uvedeno, kromě shrnutí a popisu jednotlivých metod, chování a působení vlhkosti v betonu z pohledu její migrace ve vztahu k porézní struktuře betonu, protože migrace vlhkosti ve struktuře betonu je spjata s popisem porézního systému betonu.

V návaznosti na teoretickou část práce budou v praktické části porovnány aktuální dostupné poznatky z experimentálních stanovení vlhkosti v betonu a vyvozeny dílčí závěry. Vybrané metody stanovení vlhkosti v betonu budou laboratorně ověřeny na několika druzích betonu s odlišným obsahem vlhkosti v betonu. Dosažené výsledné vlhkosti v betonu budou mezi sebou porovnány a vyhodnoceny ve vztahu k použitým metodám stanovení.

Pro vypracování bakalářské práce bude využita uvedená literatura, doplněná o vlastní zdroje. Rozsah práce cca 40 stran.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou stanovení vlhkosti v betonu. V první části se nachází popis vztahů mezi vlhkostí a betonovou strukturou. Druhá část se věnuje metodikám stanovení vlhkosti v betonu, jenž jsou doplněny o vlastní experiment. Cílem práce je zhodnocení přesnosti a relevance vybraných metod stanovení vlhkosti v betonu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, pórovitá struktura, trvanlivost betonu, transportní procesy, metody stanovení vlhkosti, měření vlhkosti

## ABSTRACT

This bachelor's thesis studies issues of moisture determination in concrete. First part describes relationship between moisture and concrete structure. Second part is dedicated to methodology of concrete moisture determination and also to an own experiment. Main focus of thesis is to evaluate the accuracy and relevance of selected methods of determining the concrete moisture.

## KEYWORDS

Concrete, porous structure, durability of concrete, transport processes, methodology of moisture determination, moisture measurement

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Dominik Vaněk *Problematika experimentálního stanovení vlhkosti betonu*. Brno, 2021. 69 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Problematika experimentálního stanovení vlhkosti betonu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 28. 5. 2021

---

Dominik Vaněk

autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Problematika experimentálního stanovení vlhkosti betonu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 28. 5. 2021

---

Dominik Vaněk

autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Zde bych chtěl poděkovat především svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Sedlmajerovi, Ph.D. za velkou ochotu, trpělivost a odbornou pomoc při zpracování této práce. Poděkování patří také rodině a kamarádům za neustálou podporu během studia.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>CÍL PRÁCE .....</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1</b>	<b>Beton .....</b>	<b>11</b>
3.1.1	Cement .....	12
3.1.2	Voda .....	13
3.1.3	Kamenivo .....	13
<b>3.2</b>	<b>Pórovitost betonu .....</b>	<b>15</b>
3.2.1	Trvanlivost betonu .....	16
3.2.2	Vodotěsnost betonu–permeabilita .....	17
3.2.3	Mrazuvzdornost a CHRL .....	18
<b>3.3</b>	<b>VLHKOST v betonu.....</b>	<b>20</b>
3.3.1	Závislost vlhkosti na čase.....	20
3.3.2	Transportní procesy vlhkosti.....	21
3.3.2.1	Sorpční procesy .....	22
3.3.2.1.1	Fyzikální sorpce .....	22
3.3.2.1.2	Chemisorpce.....	23
3.3.2.2	Sorpční izotermy .....	23
3.3.2.2.1	Freundlichova izoterma.....	23
3.3.2.2.2	Langmuirova izoterma .....	24
3.3.2.2.3	Metoda B.E.T (Brunauer, Emmet, Teller) .....	25
3.3.2.3	Difúze vodní páry .....	27
3.3.2.4	Kapilární pohyb vody .....	28
3.3.3	Vysychání betonu.....	29
<b>4</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1</b>	<b>Destruktivní metody .....</b>	<b>31</b>
4.1.1	Metoda gravimetrická .....	31
4.1.2	Metoda karbidová (CM metoda).....	32
4.1.3	Zkouška s vývrty .....	33
<b>4.2</b>	<b>Nedestruktivní metody .....</b>	<b>34</b>



4.2.1	Kapacitní metoda .....	34
4.2.2	Odporová metoda .....	36
4.2.3	Radiometrická metoda .....	37
4.2.4	Mikrovlnná metoda .....	38
4.2.5	Termografická metoda (infračervená metoda).....	39
4.2.6	Metody používané u betonových podlah a potěrů .....	40
4.2.7	Metoda snímání nárazových zvukových vln.....	42
4.2.8	Metoda na základě nanotechnologií nebo mikroeletromechanických součástí 43	
<b>4.3</b>	<b>Experimentální měření .....</b>	<b>48</b>
4.3.1	Metodika experimentu .....	48
4.3.2	Měření vlhkosti kapacitním vlhkoměrem Greisinger GMK 100 .....	49
4.3.3	Měření vlhkosti kapacitním vlhkoměrem Greisinger GMI 15.....	50
4.3.4	Měření vlhkosti mikrovlnným vlhkoměrem MOIST 350.....	51
4.3.5	Měření vlhkosti sondou Testo 635 .....	52
4.3.6	Měření vlhkosti gravimetrickou metodou .....	52
4.3.7	Vyhodnocení naměřených hodnot.....	53
<b>4.4</b>	<b>Diskuze výsledků .....</b>	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ.....</b>	<b>62</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>63</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>68</b>

# 1 ÚVOD

Beton je v dnešní době jeden z nejpoužívanějších materiálů. Jednou ze vstupních složek výroby je voda, která je nezbytná z několika důležitých aspektů. Problematika vody a vlhkosti je nadále řešena i v pozdějších stádiích, především z pohledu návazných technologických procesů a také z pohledu trvanlivosti. Voda se v betonu může vyskytovat ve všech skupenstvích a působit na mnoha rozhraních. Stojí za jeho vznikem a v mnoha případech i za jeho degradací. Přidaná voda slouží především k zajištění procesu hydratace, který formuje výsledné mechanické vlastnosti betonu. Obecně se voda v betonu pojmenovává jako vlhkost, jelikož tento název nerozlišuje různé fáze vody. Přebytková vlhkost pak může způsobovat mnoho degradačních poruch, jako je narušení struktury betonu, zhoršení mrazuvzdornosti betonu nebo může sloužit jako transportní médium pro agresivní látky.

Spolu s hydratací vzniká i pórovitá struktura betonu, která je prostorem pro výskyt a transport vlhkosti. Pohyb vlhkosti betonem je způsoben mnoha faktory. Nejčastěji je spouštěcím mechanismem gradient určitých fyzikálních veličin nebo výskyt různých chemických potenciálů.

Koncepce stanovení vlhkosti v betonu se většinou rozděluje podle principu měření, kde jsou měřeny nebo pozorovány specifické fyzikální vlastnosti betonu nebo častěji podle dopadu na měřenou konstrukci, kdy metodiky stanovení rozdělujeme na destruktivní a nedestruktivní. Problém ve stanovení vlhkosti betonu je především v požadavku na přesné výsledky bez nutnosti porušení konstrukce. Obecně platí, že destruktivní metody jsou velmi přesné a používají se jako metody srovnávací. Metody nedestruktivní jsou často voleny především pro snadnou manipulaci a pro jejich rychlost vyhodnocení, ovšem mnohdy jejich výsledky neuvádějí dostatečně přesná data.

## 2 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je shrnout dosavadní poznatky o problematice stanovení vlhkosti v betonu. Teoretická část je zaměřena na studium vlastností betonu, především jeho pórovité struktury, v návaznosti na pórovitost je řešena problematika působení vlhkosti v betonu z hlediska chování a pohybu v pórové struktuře. Praktická část si klade za cíl shrnout teoretické poznatky v oblasti měření a stanovení vlhkosti v betonu. Měli by být popsány jednotlivé metody stanovení vlhkosti v betonu vzhledem k principu stanovení vlhkosti a výstupu měřených hodnot. Mělo by se jednat o aktuálně využívané metody, popřípadě s doplněním o netradiční nebo experimentální metody. V návaznosti na poznatky z teoretické a praktické části s konkrétními závěry budou zvoleny nejpoužívanější a nejefektivnější metody pro praktické měření vlhkosti v betonu. Následně bude provedeno vyhodnocení výstupů jednotlivých metod a zhodnocení jejich použití včetně vzájemného porovnání.

### 3 TEORETICKÁ ČÁST

Tato část práce se věnuje dosavadním poznatkům o vlhkosti působící v betonu. Je zde popsáno její chování, vliv a pohyb betonovou strukturou. Tato část je také doplněna o seznámení s betonem a popis jeho pórové struktury, která úzce souvisí s trvanlivostí betonu.

#### 3.1 BETON

Beton je považován za nejrozšířenější stavební látku. Jedná se o kompozit skládající se z plniva (převážně kamenivo) a pojiva (hydraulické maltoviny s póry). Jako hlavní výrobní složku v betonu považujeme v nejčastějším případě cement, který spolu s vodou tvoří tzv. cementový tmel, ten pak při smíchání s kamenivem tvoří čerstvý beton. Až po zatvrdnutí (zrání) této směsi vzniká stavební materiál s požadovanými konstrukčními vlastnostmi. Budoucí vlastnosti betonu jsou ve velké míře předurčeny zvoleným poměrem a složením základních surovin. Vzhledem k nynějším ekonomickým a environmentálním požadavkům se dnes ve velké míře využívají přísady a příměsi pro zlepšení počátečních (konzistence, tuhnutí, tvrdnutí) a konečných (pevnosti, odolnost, trvanlivost) vlastností [1][2].

Beton se prezentuje především svojí vysokou pevností v tlaku. Pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti ve smyku však dosahují pouze zlomku hodnot pevností v tlaku a z tohoto důvodu je důležité v místech namáhaných na ohyb a smyk opatřit beton příslušným vyztužením. Mezi vyztužovací prvky řadíme především ocel, která se osazuje v železobetonech. Ocelové výztuže mohou být i předem předepruty, této vlastnosti se pak využívá v předpjatých betonech. Mimo jiné lze beton vyztužovat i jinými komponenty jako jsou vlákna (ocelová, polymerní, skelná), pak se tedy jedná o vláknobetony nebo drátová síť, jenž je používána u síťobetonů. U betonu, který je namáhán pouze tlakem není výztuž potřeba, a proto se nazývá prostý beton [1][2].

Mezi hlavní parametry rozdělení betonů se řadí objemová hmotnost. Podle ní se betony člení na lehký beton ( $800\text{--}2000\text{ kg/m}^3$ ), dále pak beton obyčejný ( $2000\text{--}2600\text{ kg/m}^3$ ) a nakonec beton těžký ( $\geq 2600\text{ kg/m}^3$ ). Dalším významným parametrem pro rozdělení betonů je pevnost v tlaku, podle které se rozlišují tzv. pevnostní třídy. Jednotlivé třídy se značí např. C 25/30 kdy číslo před lomítkem značí pevnost v tlaku provedenou na válci o výšce 300 mm a průměru 150 mm. Číslo za lomítkem představuje pevnost v tlaku

zjištěnou na krychli o hraně 150 mm. Obě hodnoty jsou vyjádřeny v MPa a jsou zjišťovány na vzorcích s 28denním stářím. Rozsah tříd pro těžké a obyčejné betony je značen od C 8/10 až C 100/115 a lehké betony LC 8/10 až LC 80/88. Patří zde i rozdělení vysokopevnostních betonů s třídami vyšší než C 50/60 u betonů těžkých a obyčejných a třídy vyšší než LC 50/55 u betonů lehkých [1][2][3].

Dle normy ČSN EN 206 – A1 jsou betony rozděleny podle stupňů vlivu prostředí, kterým mohou být v konstrukci vystaveny. Tyto vlivy mohou být fyzikálního i chemického původu. Stupně prostředí dle ČSN EN 206–A1 ČSN P 73 2404:

1. Bez nebezpečí koroze nebo narušení – znač. X0
2. Koroze vlivem karbonatace – znač. XC1 až XC4
3. Koroze vlivem chloridů (ne z mořské vody) – znač. XD1 až XD3
4. Koroze vlivem chloridů z mořské vody – znač. XS1 až XS3
5. Působení mrazu a rozmrazování (s rozmraz. prostředky/bez nich) – znač. XF1 až XF4
6. Chemické působení – znač. XA1 až XA3

Konstrukce může být vystavena i více vlivům najednou, tím je pak ovlivněna i výsledná klasifikace odolnosti. Mezi další parametrizace betonu patří rozdělení podle technologie výroby, které jsou buď betony vyráběné přímo na staveništi nebo transportbetony [2][3].

### **3.1.1 Cement**

Cement v betonu zastává funkci pojiva. Řadí se mezi pojiva hydraulická, kdy při smíchání cementu s vodou dochází k tvorbě cementového tmelu, který reaguje jak v suchu, tak ve vodě. V obou podmínkách dochází k tuhnutí a tvrdnutí a vzniká cementový kámen. Cementy se dělí do tříd, a to podle nejnižší zjištěné pevnosti v tlaku změřené na normalizovaných vzorcích (trámeček 40×40×160 mm). Obecně se tedy dělí do tří tříd a to 32,5, 42,5 a 52,5 [2].

Dále cementy dělíme podle druhu složení, především podle obsahu slínku. Toto rozdělení je uvedeno v normě ČSN EN 197-1. Obvyklá objemová hmotnost cementů používaných u konstrukčních staveb je mezi 3050–3150 kg/m<sup>3</sup>. Poměrně rozhodujícím faktorem při výběru cementu je počátek a doba tuhnutí, kdy minimální počátek tuhnutí se udává 45–60 minut (obvykle 3–5 h.) a doba tuhnutí se obvykle pohybuje mezi 4–6 hodinami (max. 12 h.). Urychlení či zpomalení tuhnutí lze dosáhnout regulací obsahu vody nebo

proteptováním. Druh cementu určuje i budoucí vývin hydratačního tepla. U cementů s portlandským slínkem se po osmi hodinách hydratační teplo pohybuje od 35 do 100 kJ/kg. Po 28 dnech pak teplo dosahuje hodnot mezi 350–550 kJ/kg. Na průběh hydratace má také vliv měrný povrch cementu, kdy platí, že při větším měrném povrchu cement hydratuje rychleji a kvalitněji. Obvyklá hodnota měrného povrchu cementů se pohybuje mezi 250–400 m<sup>2</sup>/kg [2].

### **3.1.2 Voda**

Voda v betonu plní dvojí funkci – hydratační a reologickou. Její hydratační funkce spočívá v účasti na hydratačním procesu, jehož vlivem beton tuhne a tvrdne. Reologická funkce se zaslouhuje o tvárnost čerstvé směsi. Voda se pro použití do betonu dělí na záměsovou, přidávanou do čerstvé směsi za účelem vzniku hydratačních produktů a vodu ošetřovací, která udržuje betonovou směs ve vlhkém prostředí. Veškeré vody využití v betonu musí splňovat kvalitativní podmínky použití, které se odvíjí od použitého zdroje vod a jsou podloženy normami ČSN EN 1008 a ČSN 72 2028 [2].

Použitelnost vod:

- Voda pitná – je možno ji použít bez jakéhokoliv přezkoušení. Vždy vyhovuje požadavkům normy.
- Voda užitková a přírodní zdroje vod – před použitím je zapotřebí zkoušek, které ověří, zda voda vyhovuje parametrům normy (především obsah látek ovlivňující hydratační proces).
- Voda mořská – lze ji použít pouze v prostých betonech, naopak při použití v betonech vyztužených železem by nevyhovoval obsah Cl-iontů.
- Voda recyklovaná – jedná se o vodu, která se používá v uzavřeném výrobním procesu, u které se denně měří objemová hmotnost.
- Vody splaškové a odpadní – splaškové vody jsou nevyhovující, vody odpadní musí splňovat noremní kritéria, aby mohla být použita (před použitím i pravidelně během používání) [2].

### **3.1.3 Kamenivo**

Kamenivo tvoří hlavní pevnostní kostru betonu, tudíž pro dosažení požadované pevnostní třídy betonu je nutné zvolit správné parametry použitého kameniva. Kamenivo využívané

v betonech obsahuje zrna do maximální velikosti 63 mm. Kamenivo můžeme dělit podle objemové hmotnosti na lehké (do 2000 kg/m<sup>3</sup>), hutné (od 2000–3000 kg/m<sup>3</sup>) a těžké (nad 3000 kg/m<sup>3</sup>). Dále ho také dělíme podle jeho původu na přírodní či umělé a podle jeho vzniku na těžené či drcené. Pro zvolení správného typu kameniva je nutné vzhledem k petrografii, mineralogickému složení a velikosti zrn vzít ohled na podmínky prostředí výstavby, technologii výstavby konstrukce a pohledové požadavky.

Při výběru frakce kameniva je nutné zvážit jaké budou tloušťky krycích vrstev, mezery mezi výztuží nebo zda bude beton čerpán. Všechny tyto podmínky mohou ovlivnit horní mez frakce kameniva. V souvislosti s maximální velikostí zrna je i požadavek na ideální zrnitost kameniva. Ta se snaží dosáhnout toho, aby kamenivo složené z určitého rozsahu frakcí bylo plně obaleno cementovým tmelem a nevznikaly mezery, které by vedly ke zvýšené spotřebě cementu. Pro tyto účely se nejčastěji využívá tzv. Fullerovy křivky zrnitosti, kterou lze vyjádřit vztahem [1][2]:

$$y_i = 100 \cdot \sqrt{\frac{d_i}{D_{max}}}$$

Kde je  $y_i$  odpovídá celkovému propadu na sítu o jmenovitém rozměru  $d_i$

$D_{max}$  pak vyjadřuje hodnotu největšího použitého síta.

Pro návrhy jsou pak vytvořeny ideální křivky zrnitosti pro maximální velikost zrn 4, 8, 11, 16, 22, 32 a 63 mm [1][2].

### 3.2 PÓROVITOST BETONU

Beton je pórovitý materiál stejně jako mnoho dalších stavebních materiálů. Pórovitá látka se obecně skládá z pevné matrice a částí pórové struktury s kapalnou a plynnou fází, kterou nazýváme póry [14]. Pórovitost je následně úzce spjata s výskytem vlhkosti v betonu a její obsah je podmíněn tím, že v dnešní době je prakticky nemožné dosáhnout 100 % zhutnění betonových směsí. Následné vlastnosti pórové struktury materiálu se odvíjí především od jejího celkového objemu a distribuce jednotlivých pórů, které se od sebe liší velikostí, tvarem a vzájemným propojením. Vznik pórové struktury je navázán na hydratační procesy v betonu, kdy s postupně se zvyšujícím objemem hydratačních produktů dochází ke zmenšení poloměrů nově vzniklých pórů. Další příčinou vzniku pak může být přidání provzdušňovací přísad [1][7][9][14].

Vzniklé póry mohou být rozděleny podle velikosti následovně [14]:

- *Gelové* ( $10^{-9}$  m) – tyto póry vznikají spolu se vznikem hydratačních produktů.
- *Kapilární* ( $10^{-6}$ – $10^{-5}$  m) – jejich vývoj je značně ovlivněn vodním součinitelem, přičemž s jeho zvyšující se hodnotou se také zvyšuje obsah těchto pórů. Dále také ovlivňují permeabilitu a odolnost betonu. (jiné zdroje např. [7] uvádí rozsah těchto pórů v rozmezí  $10^{-7}$ – $10^{-4}$  m)
- *Technologické* ( $10^{-4}$ – $10^{-3}$  m) – tento druh pórů vzniká při zpracování čerstvého betonu tím, že vzduch zůstane zachycen v betonu. Tyto póry lze z velké části odstranit zhutněním betonu, ale nikdy ne úplně.

Dalším důležitým parametrem pórů je jejich tvar. Uzavřené (nespojité) póry spolu s některými druhy otevřených pórů, jako jsou slepé nebo ukončené, jsou pro vodu obecně nepřístupné, tudíž co se pohybu vody týče, mohou se tyto póry považovat jako součást pevné matrice. Naopak otevřené póry (spojité), které jsou spojeny s povrchem látky kapilárami, jsou schopny přijímat jak kapalnou vodu, tak vzdušnou vlhkost a významně ovlivňují vlhkostní pochody. Tyto póry se označují jako pórovitost otevřená a v betonech vzniká především odpařováním vody (vysoušení) [1][7][9][14].

Póry v betonu můžeme také rozdělit podle druhu vzniku a výskytu podle Maria Collepardiho na [8]:

- a) Póry vzniklé neadekvátním zhutněním betonové směsi a následným neodstraněním přebytečného vzduchu. Tento proces má za následek vznik nežádoucích makrodutin.



- b) Póry obsažené v zrnech kameniva. Tato kameniva se používají pro lehké betony. Výsledkem je nárůst tepelně izolačních vlastností, ale za cenu ztráty mechanických parametrů.
- c) Uzavřené sférické póry vzniklé od provzdušňovací přísady. Tyto póry jsou záměrně vytvářeny pro betony s požadavky na mrazuvzdornost.
- d) Póry vzniklé mezi hydratujícími zrny cementu. Jejich tvar je nepravidelný a velikostně se pohybují mezi 0,1 až 10  $\mu\text{m}$ . Tyto póry se také označují jako kapilární a jejich výskyt lze ovlivnit vodním součinitelem nebo způsobem ošetřování.
- e) Póry vzniklé uvnitř hydratačních produktů (především C-S-H gely). Tyto gelové póry velikosti 1-10 nm lze zaznamenat pouze plynovou adsorpcí (N, He).

Pórový prostor, obsažený ve struktuře betonu, umožňuje výskyt vlhkosti, která má velký vliv především na trvanlivost. Největší vliv na pohyb vlhkosti má otevřená kapilární pórovitost (spojitá), která výrazně snižuje trvanlivost betonu. Její objem v betonu může být regulován, a to především vodním součinitelem. Rostoucí vodní součinitel zvyšuje dobu ošetření, která je úzce spjata s dosažením dostatečného stupně hydratace. Vysoké hodnoty stupně hydratace nám zajistí vyšší voděodolnost betonu [8].

### 3.2.1 Trvanlivost betonu

Zajištění trvanlivosti je nedílnou součástí návrhu betonových konstrukcí. Výsledná trvanlivost betonových prvků je úzce spjatá s parametry a výskytem pórovité struktury. Tento pojem vyjadřuje schopnost betonu odolávat především vnějším vlivům po dobu navrhované životnosti konstrukce, aniž by byly zásadně sníženy jeho mechanické vlastnosti nebo jiné návrhové funkce. I proto jsou při návrhu betonu zohledňovány stupně vlivu prostředí, které jsou uvedeny v kapitole 3.1. Snížení trvanlivosti způsobují především degrační procesy, které můžeme dělit na [2][15][16]:

- Chemické vlivy – u těchto vlivů dochází ke korozi materiálu vlivem působení chemicky agresivních roztoků, které způsobují degradace jako jsou karbonatace, sulfatace, atd.
- Fyzikální vlivy – patří zde především vliv nízkých, ale i vysokých teplot, abrazivnost, kavitace, UV záření.

Tyto děje způsobují hlavně klimatické podmínky, podmínky uložení betonu, mechanické vlivy a chemická agresivita prostředí. U většiny degradačních procesů je spouštěčem právě pohyb vody, a tudíž má trvanlivost úzkou spojitost s pórovou strukturou a výskytem trhlin v betonu, jenž jsou schopny vést vodu. Chemické vlivy využívají pohyb vody k transportu agresivních látek do vnitřku struktury, kde dochází k degradaci betonu. Takto narušený beton už neposkytuje dostatečnou ochranu výztuže a dochází k její korozi, což má za následek snížení mechanických vlastností betonu. Jak už bylo uvedeno, v betonu je vznik nežádoucích kapilárních pórů ovlivněn především vodním součinitelem, naopak vznik trhlinek je zapříčiněn lokální napjatostí (překročení pevnosti cementového kamene) a smršťováním. Oba tyto faktory významně ovlivňují výskyt otevřené pórovitosti a podporují vznik degradačních jevů. Jedním z parametrů, který specifikuje pohyb vody betonem je vodotěsnost betonu [2][15][16].

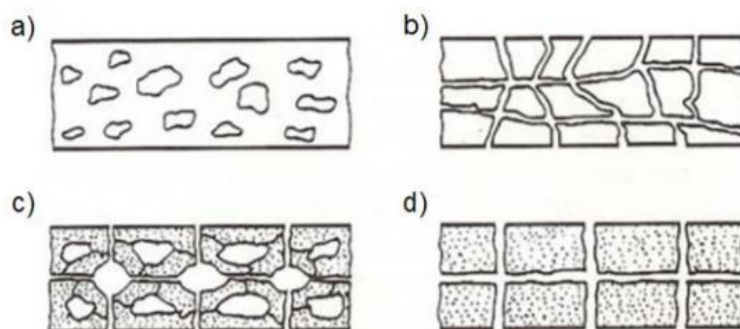
### **3.2.2 Vodotěsnost betonu–permeabilita**

Vodotěsnost je často interpretována s propustností při působení vody, ale propustnost jako taková je obecně nazývána jako permeabilita. Permeabilita je charakteristika, která představuje odolnost látky proti vnikání kapalin, plynů a tepla. U betonu se soustředíme především na schopnost vody pronikat do struktury betonu. Rychlost této funkce je odvozena z parametrů pórové struktury. Záleží především na výskytu kapilár a makropórů, jenž jsou pro vedení vody zásadní. Póry o menší velikosti jsou většinou uzavřené a na vedení vody se nepodílí (mikropóry). Nicméně vliv na hodnotu permeability nemá jen velikost pórů, ale i jejich distribuce a vzájemná poloha. Výsledný vztah permeability a pórovitosti může být rozdělen podle Bakkeru na (viz obr.1):

- a) pórovitá a nepropustná struktura
- b) pórovitá a propustná struktura
- c) vysoce pórovitá a málo propustná struktura
- d) vysoce pórovitá a vysoce propustná struktura

Zjednodušeně lze tedy konstatovat, že největší vliv na vodotěsnost nebo permeabilitu betonu má celkový objem otevřené spojitě pórovitosti a způsob transportu vody, popřípadě jiných médií. Vodotěsnost se vyjadřuje hloubkou průsaku, která je prováděna dle ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou

vodou. Podstatou zkoušky je působení vodního tlaku na kostky o hraně 150 mm. Ze spodní strany kostky se vyvíjí tlak o velikosti  $500 \pm 50$  kPa, který působí po dobu  $72 \pm 2$  hodin. Následně se těleso rozlomí v půli kolmo na povrch, kde byl vyvíjen tlak a zaznačí se hranice průsaku. [2][15][20][32].



*Obr. 1 Vztah mezi permeabilitou a pórovitou strukturou [42]*

### 3.2.3 Mrazuvzdornost a CHRL

Jedná se o další trvanlivostní parametr betonu. Vyjadřuje schopnost betonu odolávat cyklickému zmrazování a rozmrazování. Největší vliv na výskyt degračních procesů způsobených mrazem má charakter pórové struktury a stupeň nasycení betonu. Rozsah především kapilárních pórů negativně ovlivňuje vývoj nežádoucí degradace, jelikož v těchto pórech dochází ke tvorbě ledu již při teplotách kolem  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Právě velikost pórů má rozhodující vliv na teplotu při, které se tvoří led, například u pórů gelových ( $10^{-9}$  m) dochází ke tvorbě ledu až při teplotách nižších než  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . S tvorbou ledu dochází ke zvětšování objemu, jelikož led má asi o 9 % větší objem než kapalná voda. Se snižováním teploty dochází ve větších pórech k tvorbě ledu, který následně vyvíjí tlak a dochází k vytlačení vody do pórů menších, kde dochází ke vzniku hydraulického tlaku. Ke vzniku porušení struktury betonu dochází, jakmile tento tlak překoná tahovou pevnost matrice [1][2][17][18].

Jiná teorie popisuje rozdíl v teplotní roztažnosti ledu ku cementové matici a kamenivu. Tento proces je zásadně ovlivňován přítomností rozmrazovacích látek (NaCl), které v těchto situacích vytváří silné krystalické tlaky daných solí, jenž opět narušují strukturu betonu (viz. Obr. 2) [17][18].

Odolnost povrchu betonu proti působení vody a chrl je možné stanovit třemi metodami – A, B nebo C. V dnešní době se nejčastěji používá metoda A a C. Při metodě A je vzorek

(nejčastěji krychle) ponořen do 3 % roztoku NaCl, a poté je cyklicky zmrazován a rozmrazován ( $-15/+20$  °C). Výsledkem zkoušky je hmotnost vzniklého odpadu v g na  $m^2$ , který se z betonu uvolní působením rozmrazovací látkou. [33]



*Obr. 2 Povrch betonu porušený mrazem a rozmrazovacími prostředky [31]*

### 3.3 VLHKOST V BETONU

Vlhkost je fyzikální veličina, která definuje přítomnost vody ve struktuře materiálu. Vlhkostní parametr v betonech je úzce spjatý s jeho pórovou strukturou a jeho přítomnost ovlivňuje vlastnosti jako objemová hmotnost, mrazuvzdornost, tepelná vodivost, pevnost. Je také častou příčinou degradačních procesů. Betony téměř vždy vykazují nenulovou hodnotu vlhkosti [1].

Vlhkost je v kompozitech na bázi cementu obsažena ve dvou stavech. V prvním stavu jako voda neodpařitelná, která je vázána v krystalických mřížkách hydratačních produktů jako hydroxid vápenatý nebo C-S-H gely. Tato voda se v běžném prostředí neodpařuje ani nedochází k jejímu aktivnímu pohybu, jelikož je pevně vázána chemickými silami. K jejímu uvolňování dochází až při teplotách vyšších jak 550 °C, kdy dochází k rozkladu pevných produktů. V druhém stavu se vlhkost vyskytuje jako voda odpařitelná, která vyplňuje především póry. Ta tvoří majoritní podíl celkového obsahu vody a dělíme ji na [1][12]:

- *Volná* – voda vyplňující dutiny
- *Vázaná fyzikálně* – voda vázaná Van der walsovými silami
- *Kapilární* – výplň malých pórů a dutin
- *Adsorbovaná* – voda shromažďující se na stěnách kapilár a v nejmenších pórech

Dalším významným dělením je podle zdroje vlhkosti, kde je zařazena především:

- *Výrobní vlhkost* – Hodnota je ovlivněna mokrým technologickým procesem výroby, jindy se může označovat jako technologická.
- *Zemní vlhkost* – Posuzuje vlhkost, která se do materiálu transportovala z okolního terénu. Vyskytuje se u konstrukcí, které jsou v kontaktu se zemínou, u nichž je špatně provedená hydroizolace nebo není provedena vůbec.
- *Sorpční vlhkost* – Jedná se o vlhkost, kterou materiál přijímá z okolního vzduchu.
- *Zkondenzovaná vlhkost* – Vzniká srážením na povrchu nebo vně konstrukce.
- *Provozní vlhkost* – Je závislá na podmínkách okolního prostředí [1].

#### 3.3.1 Závislost vlhkosti na čase

Množství vlhkosti v materiálu je v průběhu času proměnlivé, proto se vlhkosti dále dělí podle stáří materiálu. Při výrobě materiálu dochází k mokrým procesům dosahujících

vysokých hodnot vlhkosti, které po krátkém čas prudce klesají. Tyto hodnoty označujeme jako výrobní vlhkost. Po zabudování prvků do konstrukce už jsou hodnoty vlhkosti v porovnání s výrobními vlhkostmi podstatně nižší a stálejší. Tyto hodnoty nazýváme trvalé vlhkosti. Doba pro dosažení těchto hodnot se pohybuje mezi 2-7 lety a je výrazně ovlivněna podmínkami okolního prostředí, pórovitou strukturou a klimatickými poměry. Přípustná hodnota vlhkosti pro zabudování do konstrukce se nazývá kritická vlhkost. Ta nám určuje horní hranici vlhkosti materiálu při jejímž překročení může docházet ke vzniku objemových změn, snížení pevnosti, ovlivnění chemických vlastností aj. [1].

### 3.3.2 Transportní procesy vlhkosti

Většina transportních procesů v betonech je úzce spjata s tendencí vyrovnání stavů ať už se jedná o teplotní, tlakové nebo koncentrační gradienty. Následně pak tyto procesy mohou být podpořeny nebo jinak ovlivněny dalšími vlastnostmi vnitřní struktury nebo transportovaného média. Danými parametry, které mohou ovlivnit transport vlhkosti materiálem jsou [4][13] :

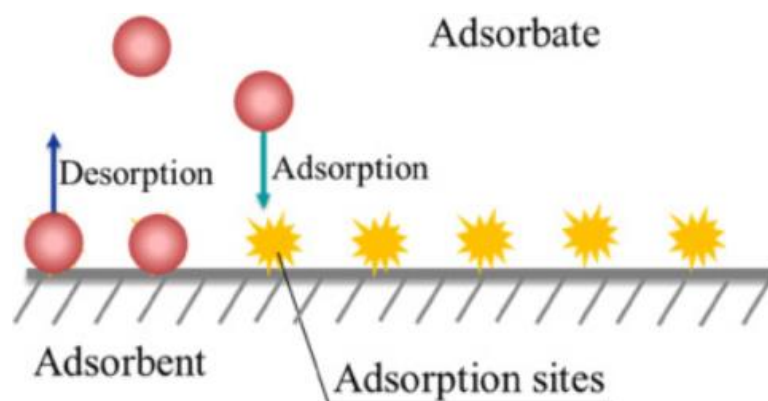
- *Vnitřní struktura materiálu* – Stavba vnitřního prostoru má zásadní vliv na průběh transportu vody, především druh, tvar a velikost pórového systému. Jelikož beton je stavební látkou vytvořené z anorganických pojiv, dochází ke vzniku pórové struktury, a tudíž i k transportu vody.
- *Skupenství vody* – Dle skupenství můžeme vodu ve stavebních látkách rozdělit na fázi plynnou, kapalnou a led. Voda ve formě pevné (Led) transportu vody zabraňuje, a to především u pórů větších rozměrů. Pro definování jednotlivých skupenství je hlavním kritériem rozměr póru, v němž se fáze nachází. Jelikož definice skupenství kapalného a plynného je u malých pórů problematická, využívá se pojmu vlhkost, který nerozlišuje oddělitelné fáze vody.
- *Vnitřní působení mezi vlhkostí a materiálem* – Jedná se o nasákové a sorpční vlastnosti stavebních látek. Velikost daných jevů se definuje výrazy hydrofilie (povrch interaguje s vodou), hydrofobie (povrch neinteraguje s vodou) a hygroskopicitu (povrch interaguje se vzdušnou vlhkostí).

### 3.3.2.1 Sorpční procesy

Tímto pojmem se rozumí pohlcování vlhkosti ze vzduchu pevnou látkou pomocí adsorpce, absorpce a chemisorpce. Celková sorpce vlhkosti se skládá z fyzikální sorpce, kde vznikají vazby na povrchu materiálu pomocí van der Waalsových sil a dále pak chemisorpce, kde molekuly vody jsou pomocí chemických vazeb přímo vázány na molekuly povrchu materiálu. (nejvíce stabilní) [1][5].

#### 3.3.2.1.1 Fyzikální sorpce

Adsorpce je proces, kdy mezi molekulami vody a pevné látky vznikají vazby způsobené van der Waalsovými silami. Výsledkem je vznik vrstev molekul (hromadění) na povrchu tuhé látky, jak je zobrazeno na obr. 3. Jelikož se jedná o fyzikální adsorpci vznikají vícevrstvé útvary a relativní vlhkost vzduchu pak ovlivňuje tloušťku vzniklé vrstvy. Adsorpce (fyzikální) není specifická, a proto probíhá po celém povrchu. Proces probíhá téměř okamžitě. Průběh adsorpce je závislý na vlastnostech adsorbátu (adsorbovaná fáze) i adsorbentu (pevná fáze na jejímž povrchu dochází k adsorpci). Desorpce je pak proces opačný adsorpci. U fyzikálních sorpcí je desorpce proveditelná, avšak u chemisorpce jen velmi obtížně nebo vůbec [1][5].



Obr. 3 Mechanismus adsorpce [41]

Absorpce je proces, kdy dochází k adsorpci vlhkosti na povrchu a zároveň k jejímu transportu do vnitřní struktury pomocí difúze. Výsledkem je vyplnění objemu sorbentu zkondenzovanou vodou [6].

### 3.3.2.1.2 Chemisorpce

Chemisorpce je proces, kdy jsou molekuly vody a tuhé látky k sobě vázány pomocí chemických vazeb. Vzhledem k povaze vazby je chemisorpce specifická, a proto vzniká jen na místech s vyšší energií a pouze v jedné vrstvě. Ve srovnání s fyzikální sorpcí je vznik pomalejší [5].

### 3.3.2.2 Sorpční izotermy

V praxi je důležitým parametrem množství adsorbované látky, které se stanoví pomocí sorpčních izoterm. Sorpční izotermy jsou ovlivněny velikostí povrchu adsorbentu, parciálními tlaky adsorbátu a teplotou. Adsorbované množství ( $a$ ) je udáváno v molech nebo jako podíl hmotnosti a objemu adsorbovaného plynu. Sorpční izotermy vyjadřují závislost rovnovážného adsorbovaného množství na rovnovážném tlaku plynu za konstantní teploty. Avšak sorpční izotermy vyjadřují pouze teoreticky odvozené vztahy, a proto se musí provést shoda s experimentem, která nám potvrdí skutečný mechanismus adsorpce [5] [6].

#### 3.3.2.2.1 Freundlichova izoterma

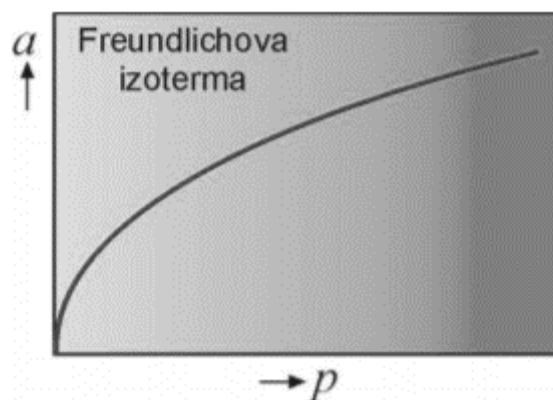
Freundlichova izoterma patří mezi nejstarší způsoby vyjádření závislosti množství adsorbovaného plynu na rovnovážném tlaku při konstantní teplotě.

$$a = k \cdot p^{\frac{1}{n}}$$

Kde je	$a$	množství adsorbované látky
	$k, n$	konstanty plynu
	$p$	tlak plynu

Konstanty  $k$ ,  $n$  jsou individuální a jsou závislé na daném plynu, adsorbentu a teplotě. Konstanta  $k$  klesá s rostoucí teplotou a konstanta  $n$  dosahuje hodnot větších jak jedna a s rostoucí teplotou se blíží jedné [5].





Obr. 4 Tvar Freundlichovy izotermy [5]

### 3.3.2.2 Langmuirova izoterma

Langmuirova izoterma představuje přesnější vztah pro případy, kdy se na povrchu se zvětšujícím tlakem tvoří monomolekulární vrstva, která brání další adsorpci, protože jeho povrch je zcela nasycen. Byla odvozena za několika podmínek jako jsou tvorby pouze jedné vrstvy molekul, k adsorpci dochází po celém povrchu a nedochází k vzájemnému ovlivňování adsorbovaných molekul.

Vztah je odvozen z rychlosti adsorpce a desorpce. Rychlost zachycení molekul na povrchu je rovna podílu volného povrchu a počtu nárazů molekul z plynné fáze na povrch, přičemž tento plyn je úměrný jeho tlaku podle kinetické teorie ideálního plynu. [5]

$$\text{Adsorpce: } r_{ads} = k_{ads} \cdot (1 - \theta) \cdot p$$

$$\text{Desorpce: } r_{des} = k_{des} \cdot \theta$$

Adsorpční rovnováha:

$$r_{ads} = r_{des}$$

$$k_{ads} \cdot (1 - \theta) \cdot p = k_{des} \cdot \theta$$

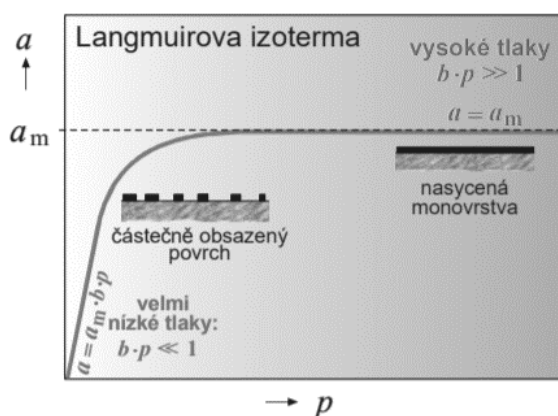
$$\theta = \frac{(k_{ads}/k_{des}) \cdot p}{1 + (k_{ads}/k_{des}) \cdot p} = \frac{b \cdot p}{1 + b \cdot p}$$

Konstanta  $b$  vyjadřuje poměr adsorpční a desorpční konstanty, která je závislá na teplotě. Podíl obsazeného povrchu  $\theta$  se vyjádří poměrem  $a/a_m$  kdy  $a$  představuje množství adsorbovaného plynu při příslušném tlaku.  $a_m$  vyjadřuje množství plynu potřebného po pokrytí povrchu monovrstvou [5].

Výsledný vztah:

$$a = a_m \frac{b \cdot p}{1 + b \cdot p}$$

Kde je      $a$                       množství adsorbované látky  
                $b$                       poměr adsorpční a desorpční konstanty  
                $p$                       tlak plynu  
                $a_m$                     množství plnu potřebného k vytvoření monovrstvy



Obr. 5 Tvar Langmuirovy izotermy [5]

Langmuirova izoterma se využívá především při chemisorpci, při níž dochází k tvorbě monovrstvy. U fyzikálních sorpcí se využívá jen za předpokladu tvorby jedné vrstvy [6].

### 3.3.2.2.3 Metoda B.E.T (Brunauer, Emmet, Teller)

Tato metoda byla odvozena pro adsorpci, při níž vznikají multimolekulární vrstvy. K adsorbování plynu ve více vrstvách dochází v případě, že proces probíhá za teploty nižší, než je jeho kritická teplota. Neboli vzniklé pole mezimolekulárních sil na povrchu monovrstvy je tedy silnější než síly mezi molekulami plynu a tím je způsoben vznik dalších adsorpčních vrstev. Odvozený vztah pro izotermy BET [5]:

$$a = a_m \frac{C \cdot p_r}{(1 - p_r) \cdot [1 + (C - 1) \cdot (p_r)]}$$

Kde je      $a_m$                       množství plynu potřebného pro vytvoření monovrstvy.

$p_r$  je poměr rovnovážné tlaku  $p$  a tlaku nasycené páry adsorbátu  $p_0$ .

$C$  představuje vztah mezi adsorpčním a kondenzačním teplem

Konstanta  $C$  je vyjádřena vztahem:

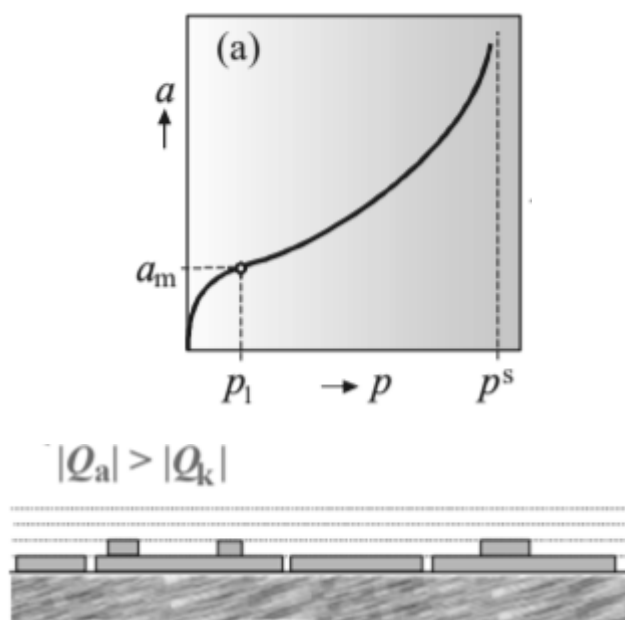
$$C = \exp \left( -\frac{Q_{ads} - Q_{kon}}{RT} \right)$$

Kde je  $Q_{ads}$  teplo adsorpční

$Q_{kon}$  teplo kondenzační.

- Izoterma BET při  $|Q_{ads}| > |Q_{kon}|$  neboli ( $C > 1$ )

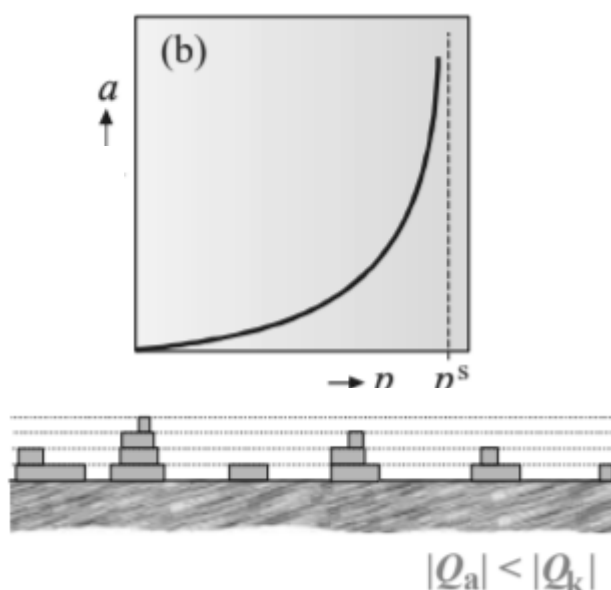
První ohraničená oblast křivky vystihuje tvorbu monovrstvy. Po dosažení tlaku  $p_1$  je téměř celá plocha pokryta monovrstvou, a tudíž s dalším přibývajícím tlakem začíná vznikat další vrstev, viz. Obr. 6. K tomuto stavu dochází, jestliže je adsorpční teplo větší než teplo kondenzační, přičemž jsou obě hodnoty vyjádřené v absolutní hodnotě. Neboli konstanta  $C > 1$  [5].



Obr. 6 Tvar izotermy BET při  $|Q_{ads}| > |Q_{kon}|$  neboli ( $C > 1$ ) [5]

- Izoterma BET při  $|Q_{ads}| < |Q_{kon}|$  neboli ( $C < 1$ )

V ojedinělých případech, kdy při adsorpčním procesu nedochází k vytvoření monomolekulární vrstvy (souvislý film) se na povrchu adsorbentu tvoří pole, na nichž jsou vytvářeny vícevrstvé útvary adsorbovaných molekul (tvorba kapek adsorbátu), viz Obr. 7. K tomuto stavu dochází, jestliže je adsorbční teplo menší než teplo kondenzační, přičemž jsou obě hodnoty vyjádřené v absolutní hodnotě [5].



Obr. 7 Tvar izotermy BET při  $|Q_{ads}| < |Q_{kon}|$  neboli ( $C < 1$ ) [5]

### 3.3.2.3 Difúze vodní páry

Tento proces transportu vlhkosti nastane, odděluje-li pórová struktura prostředí s různými parciálními tlaky vodní páry a směr difúzního toku probíhá z prostředí s vyšším parciálním tlakem do prostředí s tlakem nižším. Obecně jsou při difúzi uplatňovány mechanismy fungující na principu gradientu tlaku a gradientu teploty, které působí vzájemně proti sobě a výslednice určuje směr pohybu vlhkosti [7].

V izotermních podmínkách dochází především k molekulární difúzi založené na gradientu tlaku a řídí se podle Fickova zákona, který vyjadřuje hustotu a směr difúzního toku. Jinak ji lze také vyjádřit pomocí Knudsenova čísla ( $K$ ), což je hodnota, která vyjadřuje poměr mezi střední volnou dráhou molekuly a průměrem kapiláry. Je-li  $K < 1$ ,

jedná se o molekulární difúzi, neboť velikost póru je větší než střední volná dráha molekul. V opačném případě, kdy je  $K > 1$ , hovoříme o Knudsenově difúzi. Zde dochází k interakci molekul se stěnami matrice v důsledku toho, že velikost póru je menší než střední volná dráha molekul [10][11].

Další významnou difúzi je povrchová difúze. K té dochází při pohybu adsorbovaných molekul na povrchu stěn pórů. Už při malých vlhkostech okolního vzduchu lze předpokládat, že bude docházet ke vzniku sorpčního filmu na stěnách pórů a s tím i k vlastní difúzi [4][10].

V podmínkách neizotermních může docházet k transportu vlhkosti pomocí termodifúze. Díky rozdílné hustotě difúzních toků se vodní pára pohybuje ze směru chladnějšího do teplejšího neboli proti směru tepelného gradientu [4][10].

#### 3.3.2.4 Kapilární pohyb vody

Tento proces transportu vlhkosti se vyskytuje v jemných pórech se smáčivým povrchem a je způsoben především povrchovým napětím. Je-li pak pórovitý materiál v kontaktu s vodou, dochází k nasáknutí bez ohledu na sklon póru. Intenzita nasáknutí závisí na velikostech pórů. Struktury s většími póry nasávají rychleji, ale do menších výšek. Nasákavost vyjadřuje největší množství vlhkosti, které materiál může dosáhnout. Udává se v % hmotnosti, a to poměrem mezi hmotností nasáklého a vysušeného vzorku. Výsledek se také vztahuje k době ponoření vzorku v kapalině (1 h, 24 h, ...) [7].

Mezi největší kapilární jevy patří vzlínavost například od působení zemní vlhkosti. Je charakterizována rozdílnou výškou mezi hladinou vody v kapilárách a výškou hladiny okolní vody. Kapilární síly, s doprovodem adsorpčních sil, zajistí vystoupaní hladiny vody v kapilárách i nad úroveň okolní vody. Tento jev se také nazývá kapilární elevace. Výsledná výška je závislá na charakteristice pórů a době působení okolní vody (ponoření). Z počátku dochází k rychlému vzlínání kapaliny, které se postupem času zpomaluje. Maximální výška vzlínání se může teoreticky odvodit vzorcem [7]:

$$h = \frac{2 \cdot \delta \cdot \cos\theta}{r \cdot \rho \cdot g}$$

kde je  $\delta$  povrchové napětí kapaliny [N/m]

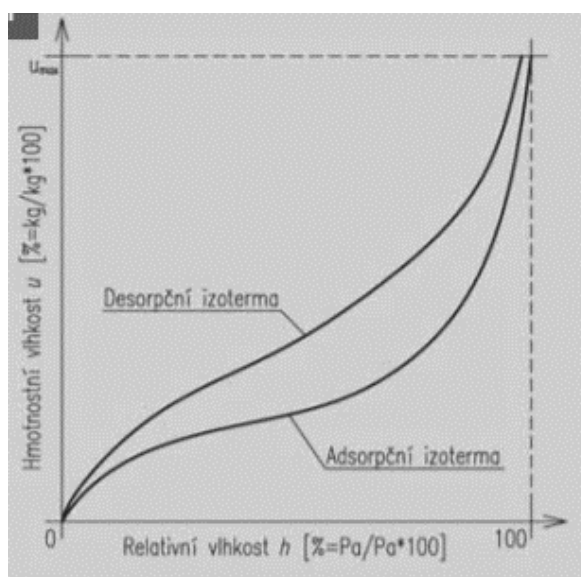
$\theta$  úhel smáčení mezi stěnou kapiláry a kapalinou [°]

$r$	poloměr kapiláry [m]
$\rho$	měrná hmotnost kapaliny [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	tíhové zrychlení [9,81 m/s <sup>2</sup> ]

K pohybu vody důsledkem vztlínání dochází především v kapilárním systému pórů o poloměrech  $10^{-4}$  až  $10^{-7}$  m a výška vztlínání roste se zmenšujícím se poloměrem póru [7].

### 3.3.3 Vysychání betonu

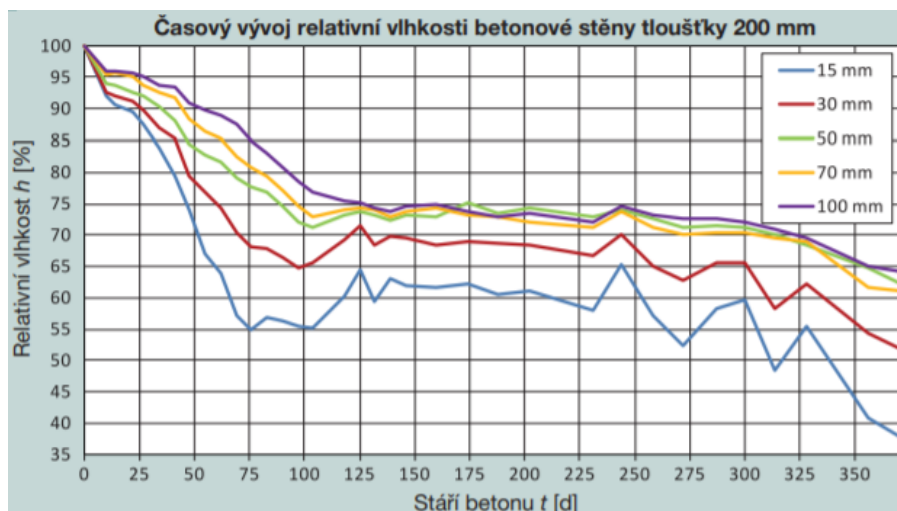
Jedná se o velmi pomalý proces. Jeho vývoj by se měl patřičně sledovat, jelikož stojí za vznikem nežádoucího smrštění betonu, což způsobuje vznik trhlin. Vysychání probíhá v řádech let, podstatnou roli zde hraje velikost prvku, jelikož menší prvky (štíhlejší) vysychají rychleji. Vlhkost betonu se mění podle prostředí, ve kterém je uložen a vždy se snaží dosáhnout rovnováhy pomocí výměny tepla a vodních par s okolím. Vztah mezi hmotnostní vlhkostí a relativní vlhkostí v pórech betonu určují sorpční izotermy. Jak bylo popsáno v předešlé kapitole, adsorpční izotermy nám zobrazují proces vlčení materiálu neboli přijímání vody. V opačném případě, kdy je voda odevzdávána vody, dochází k vysychání materiálu. Tento proces se řídí podle desorpční izotermy, která se nachází vždy nad izotermou adsorpční [36].



Obr. 8 Hysterze sorpční izotermy [36]

Vývoj vlhkosti betonu v průběhu času je velice složité předpovědět, jelikož intenzita vysychání je značně ovlivnitelná. Často se pro predikci vývoje vlhkosti uplatňují diferenciální rovnice. Avšak tyto rovnice často vyžadují složitá experimentální data, která nejsou běžně stanovována.

Důležitým parametrem je také rychlost vysychání. Beton je často mylně považován za vysušený, jakmile oschnou viditelné povrchy. Avšak skutečná rychlost vysychání betonu není nijak stanovena, a dokonce je proměnná s hloubkou pod povrchem [36].



Obr. 9 Vysychání stěny v průběhu času [36]

## 4 PRAKTICKÁ ČÁST

Tato část se nejprve věnuje teoretickému seznámení s vybranými metodami stanovení vlhkosti, které lze použít na betonové prvky. Metodika je rozdělena na destruktivní a nedestruktivní část. Dále je součástí i vlastní experiment pro stanovení vlhkosti v betonu. Cílem experimentu je zhodnotit spolehlivost měření zvolených metod stanovení vlhkosti ku metodě gravimetrické, jelikož ta je považována za metodu nepřesnější. Měření bylo prováděno na vlastně vytvořených betonových tělesech.

### 4.1 DESTRUKTIVNÍ METODY

Metody tohoto druhu stanovení vlhkosti jsou velmi přesné, ale pro jejich stanovení je zapotřebí narušit zkoušenou konstrukci. Velikost vzorku závisí na povaze konstrukce, v nejčastějších případech se však jedná o odseknutou část nebo malý vývrt. Problém nastává i při špatném provedení měření, jelikož u většiny destruktivních metod nelze vzorek použít víc než jednou a musí se odebrat nový, což vede k dalšímu narušení konstrukce. Patří zde především gravimetrická a karbidová metoda, ale také méně známá zkouška s vývrty [22].

#### 4.1.1 Metoda gravimetrická

Tato metoda stanovení vlhkosti, ačkoliv patří mezi nejúčinnější, co se přesnosti stanovení týče, rozhodně není nejčastěji prováděnou. Je také považována za metodu normovou pro stanovení vlhkosti stavebních materiálů. Způsob provádění gravimetrické metody popisuje norma ČSN EN ISO 12570. Vysoké přesnosti výsledných hodnot je využíváno pro posouzení relevance a kalibrace jiných metod především těch nedestruktivních [21][22].

##### **Postup zkoušky**

Nejdříve se ze zkoušené konstrukce odebere vzorek. Podstata odebrání vzorku se liší od parametrů konstrukce. U menších konstrukcí jako jsou například betonové podlahy se odběr provádí nejčastěji ručně, jelikož použitím pneumatických kladiv nebo jiných mechanických zařízení může docházet k vývinu tepla, které by mohlo negativně ovlivnit výsledky. Ovšem u větších konstrukcí je, vzhledem k velikosti vzorku, tepelné ovlivnění vlhkosti často zanedbatelné a pro odběr mohou být použita. Odebraný vzorek by se po oddělení z konstrukce měl co nejrychleji umístit do parotěsné nádoby nebo fólie pro



zachování vlhkosti. V laboratoři je nejprve vzorek zvážen a následně umístěn do sušárny, kde dochází k jeho vysoušení. Prostředí sušárny musí mít definovanou teplotu s ohledem na zkoušený materiál a relativní vlhkost nesmí překročit 10 %. U betonů se suší na teplotě  $105 \pm 2$  °C. Při této teplotě nedochází k odpařování chemicky vázané vody, ale pouze vody volné. Sušení se ukončí, pokud je rozdíl celkové hmotnosti, po třech následujících měřeních (odstup mezi měřeními je nejméně 24 hodin), menší než 0,1 %. Poté se vzorek vyjme ze sušárny a opět se zváží. Z naměřených hmotností se následně vyvodí výsledná hmotnostní vlhkost vzorku, a to podle vzorce [21][22][23][24]:

$$w = \frac{m_w - m_s}{m_s} [\%]$$

kde  $m_w$  ... hmotnost vzorku před vysušením [g]

$m_s$  ... hmotnost vzorku po vysušení [g]

### **Zhodnocení metody**

Největší výhodou této metody je její přesnost stanovení (až 3 %) tudíž se velmi často využívá v posudcích u soudních sporů nebo jako kontrolní stanovení pro jinou metodu. Nevýhodou je nutnost narušení konstrukce pro odebrání vzorku a doba stanovení zkoušky. Z důvodu nákladů na sušící technologie a nemožnosti provádění in-situ se v praxi často volí metody jiné [21].

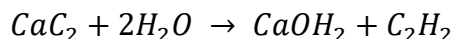
#### **4.1.2 Metoda karbidová (CM metoda)**

Jedná se o další destruktivní metodu pro stanovení vlhkosti materiálu. Od gravimetrické se liší především tím, že je možné ji provádět in-situ. Její přesnost je sice podobná, ovšem vyskytuje se mnoho faktorů, které významně narušují výsledné hodnoty. Proto se doporučuje provádět měření na dostatečném množství vzorků odebraných po celé výšce prvku. Tato metoda je založena na reakci karbidu vápenatého a vody ze vzorku [21][22].

#### **Postup zkoušky**

Na začátku zkoušky se ze zkoušeného prvku odebere vzorek. Ten se následně podrtí a zváží. Takto upravený vzorek se vloží do speciální uzavřené nádoby společně s ampulkami karbidu vápenatého a ocelovými kuličkami pro jejich rozbití. S uzavřenou nádobou je následně potřeba silně a intenzivně třepat po dobu několika minut, aby došlo

k uvolnění karbidu z ampulek a mohla nastat příslušná chemická reakce vyplývající z rovnice [23][24]:



Jak je uvedeno v rovnici výše chemickou reakcí vzniká acetylén, který je indikátorem vlhkosti ve vzorku. Jeho množství se měří tlakoměrem, kterým je nádoba vybavena. Výsledky zkoušek se vyjadřují v procentech CM, které jsou odlišné od hmotnostní vlhkosti. To je způsobeno kalibrací přístroje, která se provádí na vlhkém písku. Proto se zavádí tabulková korelace [21][23].



*Obr. 10 Sada pro metodu CM [38]*

#### **4.1.3 Zkouška s vývrty**

Patří mezi další destruktivní metody měření vlhkosti, konkrétně pro betonové desky, ale od předchozích metod se liší především odběrem vzorků, kde se vzorky odsekávaly od zkoušené konstrukce. Zde se v konstrukci vytvoří malý vrt, v němž je poté sondou prováděno samotné měření. Tato metoda je populární v zemích jako USA nebo ve Velké Británii a zkoušku podrobně popisuje americká norma ASTM F 2170 [21].

##### **Postup zkoušky**

Na začátku se u zkoušené desky vyvrtá malý vrt ( $d=\pm 1$  cm) do zhruba 40 % výšky desky. Následně se vloží plastová trubička a vrt se uzavře zátkou na dobu 72 hodin. Vrt se uzavírá z důvodu vyrovnání vlhkosti povrchu a zkoušené konstrukce, jelikož při vrtání dochází k vývinu tepla, které může zkreslit výsledky měření. Poté se odkryje zátka vrtu a

vloží se vlhkostní sonda. Ta se ve vrtu musí aklimatizovat, tento stav nastává, jakmile nedochází ke změně hodnoty po dobu alespoň 5 minut. V tento moment se může provést vlastní měření [21].

### **Zhodnocení metody**

Ačkoliv je tato metoda považována za destruktivní, narušení konstrukce není až tak zásadní a vývrt může být využíván i vícekrát na rozdíl od vzorků v obou předchozích metodách. Avšak velkou nevýhodou je opět časová náročnost z důvodu 72hodinové prodlevy mezi vyvrtáním a měřením. Kratší doba se nedoporučuje z důvodu rizika zkreslení výsledků [21].

## **4.2 NEDESTRUKTIVNÍ METODY**

Nedestruktivní metody stanovení vlhkosti jsou v praxi velmi často využívány, a to především díky rychlosti stanovení výsledků a faktu, že nedochází k porušení zkoušené konstrukce. Ovšem současná technologie těchto metod ještě není na takové úrovni, aby se výsledky srovnávala s gravimetrickou metodou, a tudíž většina naměřených hodnot má danou odchylku od skutečnosti. To je způsobeno tím, že většina nedestruktivních metod měří převážně pouze vodu nasycenou v kapilární pórovitosti materiálu. Přístroje těchto metod pracují na principu měření fyzikálních veličin, které mají úzkou souvislost s výskytem vody v kapilárách materiálu. Nejčastěji se jedná o měření elektrických veličin nebo informačních signálů [21][23].

### **4.2.1 Kapacitní metoda**

Kapacitní metoda patří mezi metodiky založené na měření elektrických veličin, konkrétně na změně dielektrické konstanty (relativní permitivity) hmoty, která se odvíjí od změny vlhkosti. Využívá se toho, že voda se svojí hodnotou relativní permitivity  $\epsilon = 82$  několikanásobně převyšuje ostatní stavební materiály, které se pohybují v hodnotách menších než 10. Tato skutečnost zajistí, že i malé množství vody způsobí velký rozdíl relativní permitivity. Schopnost molekul se orientovat v elektrickém poli výrazně ovlivňuje permitivitu, a proto je při měření možné oddělit vodu volnou a vodu vázanou, jelikož voda vázaná má na tuto funkci velmi malý vliv. Přístroje používané pro tuto metodu se nazývají příložné vlhkoměry, na jejichž spodní straně je umístěn pár elektrod, mezi kterými dochází k výměně signálu. Tudíž vlastní měření probíhá tak, že se přístroj

přítiskne k měřenému prvku a integrovaný displej okamžitě poskytuje výsledné hodnoty. Příložené vlhkoměry samy přepočítávají naměřené elektrické veličiny přímo na hmotnostní vlhkost betonu [21][23][24].

### **Zhodnocení metody**

Velkou výhodou u této metody je hloubka měření, s ohledem na parametry přístroje a objemovou hmotnost prvku, signál dosahuje až 30 mm pod povrch. Tím pádem se posuzuje vlhkost i uvnitř vzorku, a nejen na povrchu, kde může docházet k lokálním výkyvům způsobených vnějšími vlivy. Další výhodou je především rychlost, jelikož k vyhodnocení dochází v řádech sekund, což je z hlediska požadavků praxe velmi žádané. Z důvodu rychlého a technologicky jednoduchého vyhodnocení je také možné provádět daleko početnější měření, které sníží odchylku od skutečnosti, a tudíž zvýší spolehlivost vyhodnocení správných výsledků. Avšak nevýhodou je, že některé přístroje nejsou až tak spolehlivé při měření nízkých vlhkostí, a navíc je potřeba přístroj správně kalibrovat. Další parametr, který může toto měření negativně ovlivnit je výskyt rozpuštěných solí. Značnou nevýhodou je také fakt, že není podložena v normě pro stanovení vlhkosti. Tudíž je-li požadováno normové stanovení vlhkosti, nezbyvá nic jiného než se obrátit na metodu gravimetrickou. Ale i v těchto případech se využívá příložených vlhkoměrů jako předběžné nebo orientační stanovení vlhkosti před samotnou normovou zkouškou, aby nedocházelo k nadměrnému nebo opakovanému odběru vzorku pro destruktivní metody [21][23][24].



*Obr. 11 Kapacitní vlhkoměr Greisinger GMK 100 [39]*

#### 4.2.2 Odporová metoda

Odporová metoda pracuje na principu toho, že suchý beton má jiný měrný odpor než beton vlhký. Odpor suchého betonu odpovídá hodnotě  $10^{10} \Omega\text{m}$ , přičemž hodnota betonu vlhkého se pohybuje kolem  $10^{-4} \Omega\text{m}$ . Tento rozdíl vodivosti nám zajistí měřitelnou vlhkost v betonu pomocí zapichovacích vlhkoměrů [23].

##### Postup zkoušky

Do zkoušeného materiálu se zapíchnou měřící hroty, a to buď přímo na povrch nebo do předem provedených otvorů (vývrtů). Následně se na přístroji pouze spustí měření a vyhodnocují se výsledky. Před použitím je zapotřebí tyto vlhkoměry kalibrovat pro parametry betonu a určit měřený rozsah vlhkosti [21][23].



Obr. 12 Odporový vlhkoměr Greisinger GMR 110 [40]

##### Zhodnocení metody

Ačkoliv je tato metoda velmi populární, především z hlediska jednoduchosti a dostupnosti na trhu, její výsledné hodnoty bývají často vzdálené od hodnot skutečných. Velký vliv na tuto skutečnost má fakt, že často se hroty vlhkoměru zapichují na povrch betonu. Tudíž dochází k měření vlhkosti betonu pouze na povrchu prvku, kde může docházet výkyvům vlhkostí způsobených vnějšími vlivy. Další chyby měření nastávají, když v zapichovacích elektrodách dojde k přechodovému odporu, který vzniká při špatném kontaktu elektrod a materiálu nebo při příliš dlouhém měření. Navíc stejně jako u předchozí metody, výskyt rozpuštěných solí má značně negativní vliv na konečné výsledky. Z těchto důvodů se tato metoda nejčastěji používá jako orientační, ovšem při velkých i velmi malých vlhkostech poskytují tak chybné měření, že ztrácejí smysl i

orientačních měření. Závěrem tedy je, že i přes možnost nastavení měřicí křivky pro betonu, není tato metoda příliš vhodná [21][23][24].

#### 4.2.3 Radiometrická metoda

Princip této metody spočívá v moderaci rychlých neutronů, v tomto případě hlavně atomů vodíku, a právě voda je typickým zdrojem vodíku v betonu. Velmi častým zdrojem rychlých neutronů bývají směsné zářiče Am-Be, kde dochází k reakci záření alfa (Americium) s terčovými materiály (Berilium). Vodík je prvek s nízkou atomovou hmotností, a proto se rychlé neutrony o jeho jádra zbrzdí. Tento proces pokračuje, než se dosáhne tepelné rovnováhy s jádru prostředí a následně jsou tyto neutrony zaznamenány detektory pomalých neutronů. Jako detektory se používá několik druhů zařízení jako [24][27]:

- proporcionální trubice plněné  $\text{BF}_3$  nebo He 3
- scintilační detektory
- GM trubice opláštěné Cd 113

Právě objem spotřebovaného materiálu je hlavní ukazatelem výskytu vlhkosti. Obecně platí, že čím má materiál vyšší vlhkost, tím menší objem materiálu je potřebný pro zpomalení neutronů. Vyhodnocení zkoušky probíhá tak, že detektor pomalých neutronů je napojený na jednotku, která zpracovává hodnoty měření. Výsledná objemová vlhkost se pak vyhodnotí z kalibrační křivky v závislosti na četnosti impulsů nebo je rovnou přepočítávána a zobrazována na displeji přístroje. Před začátkem měření se doporučuje zkontrolovat složení betonu. Tato metoda totiž měří atomy vodíků nikoliv molekuly vody. Tudíž přidáním materiálu s velkým obsahem volně vázané vody (rašelina, uhlí) může dojít ke zkreslení výsledků. Také výskyt prvků pohlcujících pomalé neutrony (Cl, K, Li, Hg, Cr, Br) může mít dopad na konečné hodnoty. Radiometrické soupravy se dělí do tří skupin [24][27]:

- *Hlubkové* – Zařízení pro měření v kulové geometrii, které se osazuje do předem připravených vrtů/pažnic. Lze jimi měřit například vlhkost kameniva v betonárnách.
- *Povrchové* – Zde se měření provádí v polokulové geometrii a je často využívána pro měření betonových povrchů.

- *Kombinované* – Tyto přístroje jsou ve velké většině vybaveny dvěma zářiči, z nichž každý se používá na měření jiné veličiny, Am-Be zářiče pro měření vlhkosti a gama zářiče pro měření objemové hmotnosti.

Relevance výsledků, a tudíž i efektivnost měření je značně závislá na sestavení kalibrační křivky, která udává závislost mezi četností impulsů a vlhkostí materiálů. Je obecně známo, že se zvyšujícím se počtem naměřených impulsů se zvyšuje i naměřená vlhkost. Hodnoty naměřené pro sestavení kalibrační křivky musí postupem odpovídat i skutečnému měření. Sestavení kalibračního vztahu pak probíhá na sedmi na sobě nezávislých vzorcích o známé objemové vlhkosti [27].



*Obr. 13 Radiometrická souprava Troxler 3411 [24]*

### **Zhodnocení metody**

Radiometrická metoda poskytuje výhody rychlého stanovení dvou zásadních parametrů – objemové vlhkosti a objemové hmotnosti. Ovšem nevýhodou této metody je nedostatečná kvalifikace, a to především dodržení bezpečnostních předpisů pro zacházení s radioaktivními zařízeními, jenž se neustále zpříšňují. Obsluha přístroje by také měla vlastnit osvědčení, prokazující znalost správného provádění měření i zacházení s těmito typy přístrojů a v neposlední řadě, by měla umět správně vyhodnotit naměřená data [27].

### **4.2.4 Mikrovlnná metoda**

Metoda mikrovlnná je založena na emisi elektromagnetických vln mikrovlnného kmitočtu, která probíhá mezi dvěma sondami. Měřicí přístroje jsou nastaveny na rezonanční kmitočet vody a při vysílání rádiových vln do materiálu se při kontaktu s vodou absorbuje část jejich energie. Tato ztráta energie je měřitelná a na základě rozdílů

těchto hodnot je možné měřit obsah vlhkosti. K pohlcení vln ovšem může docházet i jinými způsoby než jen vlivem obsahu vody. Mezi časté jevy, které ovlivňují měření patří výskyt vyztužení, rozptyl a velikost složek kameniva a také velmi malý obsah vody [24][26].



*Obr. 14 Mikrovlnná souprava MOIST 350 [25]*

### **Zhodnocení metody**

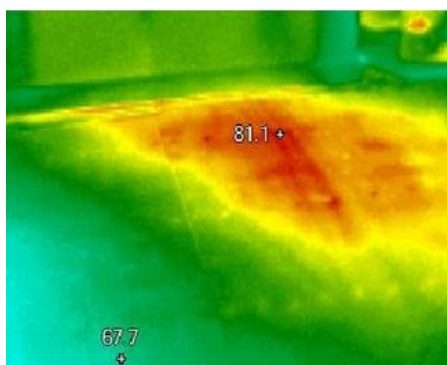
Mezi velkou výhodou této metody lze považovat především hloubka dosahu měření. Některé přístroje disponují sondami, které jsou schopny naměřit vlhkost i 800 mm pod povrchem. Dalšími výhodami jsou také téměř okamžité vyhodnocení výsledků a jednoduchost provádění. Některé přístroje jako např. Testo Moist 350 dokonce poskytují možnost tvorby tzv. vlhkostních map, které jsou ideálním grafickým vyobrazením výskytu vlhkosti. Naopak mezi nevýhody patří výskyt odchylek od skutečných hodnot při měření malých obsahů vlhkostí (obvykle do 3 %). Zde dochází k vazebným změnám molekul vody na rozhraní matrice a k rozptylu mikrovln díky nehomogenitě struktury [23][25].

#### **4.2.5 Termografická metoda (infračervená metoda)**

Termografické stanovení vlhkosti materiálů je poměrně novodobá technologie, jejíž potenciál se s předpokladem vývoje, postupně zvyšuje. Princip této metody spočívá v tvorbě tzv. vlhkostní mapy. Využívá se metody infračervené termografie, kdy se na displeji přístroje vyskytuje termogram (teplotní mapa) zkoumaného prvku. Ten vzniká



vyhodnocením záření infračerveného spektra dopadajícího na povrch prvku. Toto vyhodnocení je následně převedeno na obrazový tok. Z této teplotní mapy pak můžeme vyhodnotit místa se sníženou povrchovou teplotou, u kterých předpokládáme zvýšenou hodnotu vlhkosti. A to z důvodu, že v těchto místech je vlivem vody snížena tepelně izolační schopnost. U dosažených výsledků se v mnoha případech vyskytuje podobnost mezi vlhkostní a teplotní mapou [21][29].



*Obr. 15 Termografický snímek podlahy [21]*

#### **Zhodnocení metody**

Tato metoda patří především mezi orientační stanovení, jelikož nám nedává žádná číselná data o stavech vlhkosti. Jejím výstupem je pouze grafické vyobrazení distribuce vlhkosti. I proto se často využívá jako dodatečné stanovení pro jiné metody stanovení vlhkosti nebo jako monitorovací metoda při sledování výskytu vlhkosti v konstrukcích. Výhodou je téměř okamžité a efektivní stanovení zvýšené vlhkosti v oblasti zkoumané konstrukce [21][29].

#### **4.2.6 Metody používané u betonových podlah a potěrů**

Následující metody jsou z velké části podloženy zahraničními normami. Stanovují se především na betonových podkladech podlah, u kterých je zjištění vlhkosti kritické pro následný postup.

##### **Kalcium-Chloridová metoda**

Tuto metodu popisuje americká norma ASTM F 1869. Její princip je založen na izolování části betonové desky nepropustným krytem a reakci chloridu vápenatého s vodou. Před instalací izolačního krytu povrchu je zapotřebí prostor důkladně očistit. Následně se na tento prostor položí miska s přesnou navázkou  $\text{CaCl}_2$  a prostor se zaizoluje nepropustným

krytem tak, aby nedocházelo ke kontaminaci vnitřního prostředí s prostředím vnějším. Takto uložený kryt se po obvodu přilepí páskou k betonovému podkladu. Následujících 72 hodin se vzorek musí nechat netknutý, přičemž dochází k uvolnění vlhkosti, kterou zachytí přítomný chlorid vápenatý. Po uplynutí doby se miska vyjme a dodatečně se zapečetí, aby nedošlo k ovlivnění měření. Vzorek následně putuje na váhu, kde se opět přesně změří. Z naměřených výsledků se určí rozdíl navážek, ze kterého se přepočte množství uvolněné vody na 100 m<sup>2</sup>. Tato metoda tedy měří, zda je dosaženo dostatečné suchosti betonu pro provedení následných povrchových úprav[21][23].

### **Fóliová metoda**

Tato metoda je opět popsána americkou normou, konkrétně ASTM D 4263. Avšak jedná se spíše o orientační dokonce až náhodnou metodu. Její výhodou je značná jednoduchost a rychlost vyhodnocení. Princip zkoušky je velmi podobný předchozí metodě. U betonové podlahy se vyhradí prostor o rozměrech 450x450 mm, na který se umístí plastová fólie. Ta se následně ze všech stran utěsní lepící páskou. Po 16 hodinách se fólie odkryje a pokud je přítomna kondenzace nebo je povrch betonu vlhký (tmavý) znamená to, že podklad ještě není dostatečně suchý pro provedení dalších úprav. Jedná se o jednoduché a rychlé stanovení, avšak tato metoda je značně ovlivňována vnějšími vlivy především teplotou. Je známo, že při chladnějších i teplejších podmínkách dochází k ovlivnění výskytu kondenzátu, a tedy k chybnému vyhodnocení. Tudíž nám tato metoda neposkytuje jak číselné, tak často ani objektivní orientační výsledky [21][22].

### **Britská normová zkouška**

Tato metoda je velmi populární ve Velké Británii a spočívá ve stanovení izolované relativní vlhkosti podkladu. Pro měření se používá hygrometr, který je integrovaný nepropustné krabičce. Měření probíhá tak, že se na betonovou podlahu umístí krabička s hygrometrem a ponechá se zde po dobu 72 hodin. Během této doby s ní nesmí být jakýmkoliv způsobem manipulováno, jinak by se celý test musel provádět znovu. Výsledek se stanovuje z měření relativní vlhkosti uvolněné z podlahy. Měření se provádí každých 24 hodin, a to do doby, než se dosáhne dvou stejných výsledků v následujících měřeních. Za bezpečnou hranici pro pokládku dalších vrstev podlah se uvažuje hodnota relativní vlhkosti 75 %, která přibližně odpovídá 5 % hmotnostní vlhkosti. Výhodou je, že na rozdíl od ostatních zmíněných metod nám tato metoda poskytuje číselné výsledky, které se při dodržení všech požadavků zkoušky velmi blíží skutečným hodnotám. Naopak

nevýhodou je celková doba měření a nutnost vyhodnotit výsledky každých 24 hodin [21][22].

#### **4.2.7 Metoda snímání nárazových zvukových vln**

Jedná se o experimentální metodu založenou na snímání zvukových vln vyvolaných nárazem na zkoušený prvek. Měření vlhkosti funguje na principu kombinace poklepu kladívka, mel-frekvenčních cepstrum koeficientů (MFCCs) a metody podpůrných vektorů (SVM). Poklepy kladívka vnášíme do vzorku zvukový signál, který je zachycen mikrofonom. MFCCs nám následně analyzuje nahraný zvuk, a nakonec pomocí Metody podpůrných vektorů se indentifikuje obsah vlhkosti.

- MFCCs (mel-frequency cepstrum coefficients) – neboli mel-frekvenční cepstrum koeficienty je reprezentace krátkodobého výkonového spektra zvuku vzešlé z lineární cosinové transformace logaritmického výkonového spektra na nelineární mel-frekvenční stupnici. Používá se pro konverzi signálů, jelikož lidské vnímání signálů je lineární pouze do 1000 Hz, vyšší hodnoty jsou logaritmické.
- SVM (support vector machine) – neboli metoda podpůrných vektorů je metoda strojového učení, jenž se využívá pro klasifikaci různých obsahů vlhkosti. Je založena na transformaci dat do prostoru vyšší dimenze pro zkonstruování klasifikační nadroviny, která maximalizuje prázdný prostor nadroviny pro dosažení, co nejvyšších přesností klasifikace měření [30].

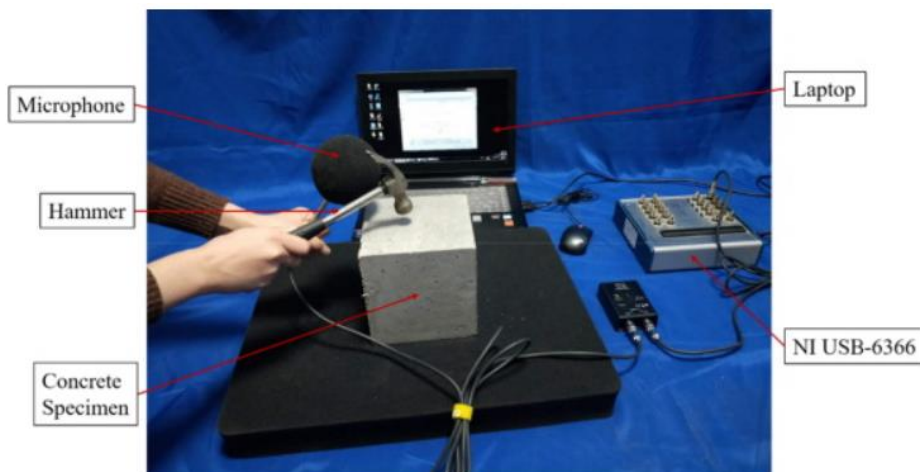
#### **Postup zkoušky**

Zkouška se stanovuje betonových krychlích o hraně 150 mm. Nejdříve se připraví mikrofón pro snímání signálů. Následně se opakovaně poklepává vzorek (100x) a mikrofón ukládá zaznamenaná data. Tyto data jsou následně transformována na MFCCs v podobě vektorů, které jsou označeny podle obsahu vlhkosti. Pro každý vzorek se vektory náhodně rozdělí na testovací a trénovací sadu. Z těchto sad se nakonec vypočte klasifikační přesnost obsahu vlhkosti pomocí metody podpůrných vektorů [30] .

#### **Zhodnocení metody**

Je nutno říct, že tato metoda je zatím čistě experimentální a je prováděna pouze v rámci testování relevance použití. Manuální část měření je velmi jednoduchá, avšak následná analýza zvuku je velmi složitá, a pro plnohodnotné využívání v praxi by se muselo vytvořit kompaktní naprogramované zařízení. Dle vyhodnocení se přesnost výsledků této

metody pohybuje mezi 97-99 % v porovnání s výsledky gravimetrické metody. Ovšem těchto výsledků je dosaženo v tichém laboratorním prostředí na reprezentativních vzorcích betonu, tudíž zde nebyl zásah vnějších vlivů (hluk) nebo různých parametrů betonu. S vývojem sofistikovaného zařízení s robotickou rukou (pro dosažení identického vývinu zvuku poklepáním), systémem filtrů pro odstranění nežádoucího hluku a programem pro transformaci signálu na obsah vlhkosti, by tato metoda mohla najít své uplatnění v praxi [30].



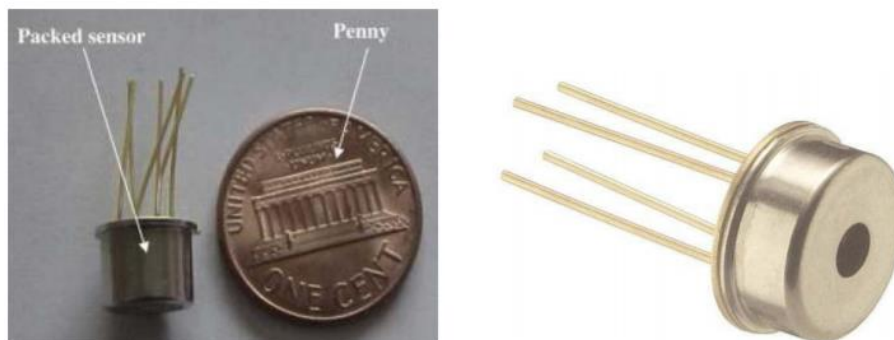
*Obr. 16 Měření poklepů kladívkem [30]*

#### **4.2.8 Metoda na základě nanotechnologií nebo mikroeletromechanických součástí**

Poslední dobou je implementace nanotechnologií velmi populární a obor stavebnictví není výjimkou. Nanotechnologické měřicí systémy nebo Mikroeletromechanické součástky (MEMS) jsou zařízení mikro až nano rozměrů, které v sobě obsahují čidla, senzory, elektrické obvody nebo ovladače. Zařízení vyhodnocuje výsledek v reálném čase a zároveň je součástí struktury. Velikost implementovaných součástek je možné vidět na obr. 15.

Hlavní funkcí tohoto zařízení je snímat teplotu a relativní vlhkost betonu to i po výšce betonu je-li správně a jednotlivě distribuováno. Výsledky měření jsou přesnější než mnoho jiných nedestruktivních metod, a to především díky tomu, že měřicí zařízení jsou uložena přímo v betonu. Vzhledem k velikosti součástek je lze dávkovat ve velkém množství od stovek až po miliony, větší dávkování samozřejmě snižuje chybu výsledků ovšem množství je limitováno některými parametry betonu jako je velikost nebo typ

betonu. Pro měření teploty a relativní vlhkosti betonu se často volí jednotlivé vkládání senzorů po výšce [34][35].



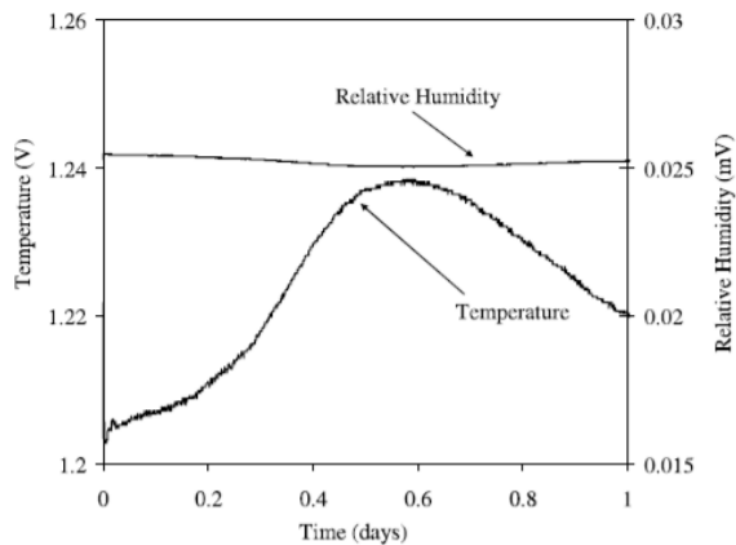
*Obr. 17 MEMS senzory [34]*

### **Postup zkoušky**

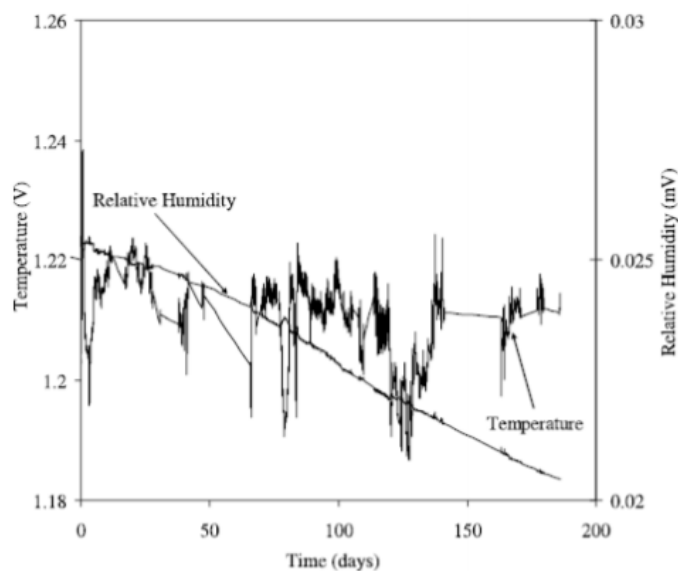
Ashley Norris, Mohamed Saafi a Peter Romine ve své publikaci provedli experiment s touto technologií následujícím postupem.

MEMS senzory se vyzkouší, zda je jejich zabudování vhodné a jestli jsou funkční. Umisťují se do střední výšky betonových válců o průměru 150 mm a výšky 300 mm v laboratorních podmínkách (22 °C a 50 % RV). Senzory jsou vybaveny elektrickým kabelem pro monitorování vlhkosti a zároveň běží na systému sběru dat. Data o naměřených vlhkostech a teplotách jsou pak zapisovány jako výstupní napětí.

U relativní vlhkosti byl nejvyšší výstup napětí (0,026 V) naměřen v okamžik vložení do čerstvého betonu, což odpovídá 100 % relativní vlhkosti, jelikož senzor je saturován vodou. Postupně však dochází k hydrataci betonu a s tím se snižuje i množství vlhkosti v betonu. Nejvyšší výstupní napětí pro teplotu betonu (1,23 V) bylo naměřeno po zhruba 12 hodinách, kdy bylo dosaženo maximální teploty hydratace [34][35].



*Obr. 18 Nasbíraná data z MEMS senzorů v průběhu prvních 24 hodin [34]*



*Obr. 19 Vývoj výstupního napětí v průběhu hydratace betonu [34]*

Pro upřesnění a relevantnost výsledků byla stanovena i kalibrace MEMS senzorů v různých teplotách a relativních vlhkostech pomocí vlhkostních komor. Na obr. 18 a 19 je možné vidět závislost hodnoty relativní vlhkosti na výstupním napětí při různých teplotách a závislost teploty na výstupním napětí. Naměřené hodnoty vykazovaly velikou linearitu s koeficientem regrese vyšším jak 0,995. Na základě těchto kalibrací byly zjištěny rovnice pro převod naměřených dat na skutečné výsledky [34][35]:

### Relativní vlhkost

$$RH = \frac{\frac{V_{RH,OUT} - 0,005}{0,002}}{1,0546 - 0,00216 \cdot T} [\%]$$

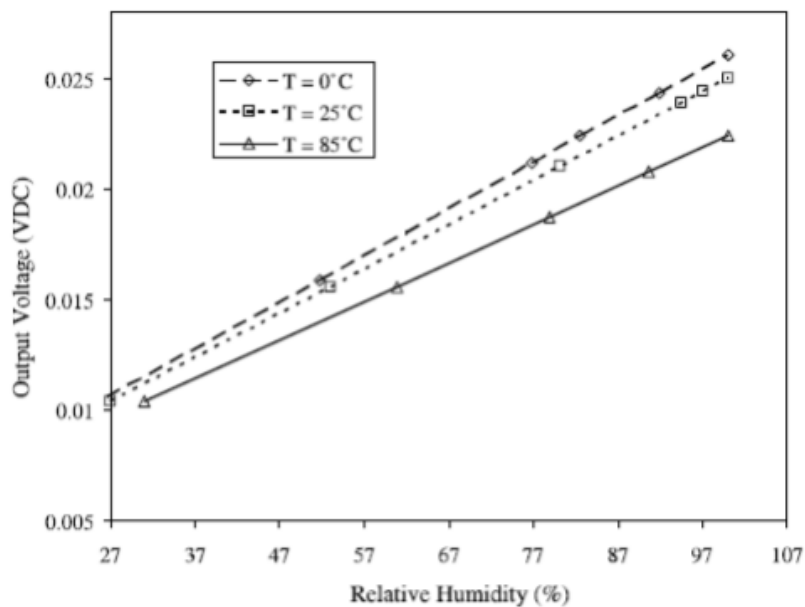
kde je  $V_{RH,OUT}$  výstupní napětí pro relativní vlhkost [V]  
 $T$  teplota [°C]

### Teplota

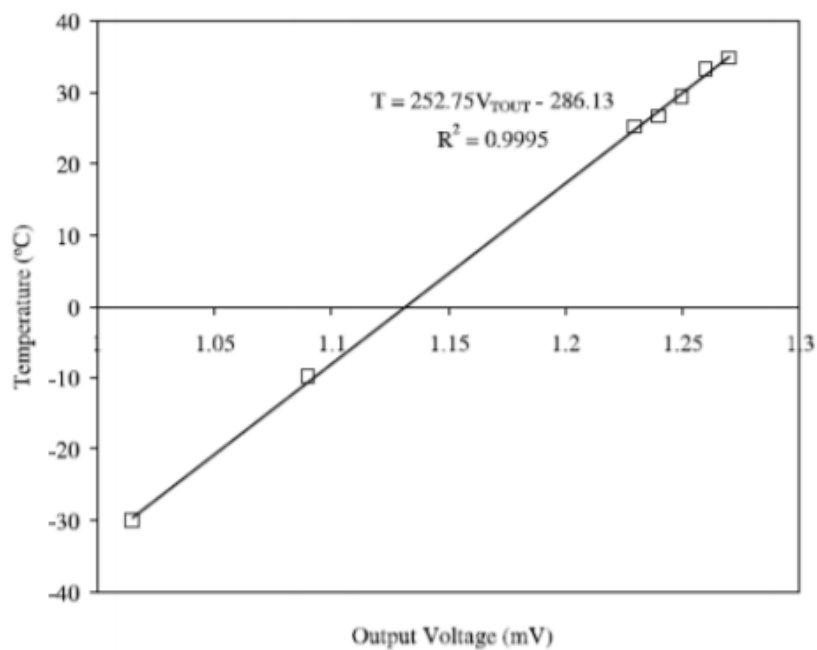
$$T = 252,75 \cdot V_{T,OUT} - 286,13 [^{\circ}\text{C}]$$

kde je  $V_{T,OUT}$  výstupní napětí pro teplotu [V]

Avšak nejedná se o univerzální rovnice. Byly odvozeny z kalibrace pro konkrétní experiment viz [35].



Obr. 20 Závislost relativní vlhkosti na výstupním napětí MEMS senzorů [34]



*Obr. 21 Závislost teploty na výstupním napětí MEMS senzorů [34]*

### **Zhodnocení metody**

Tento způsob monitorování má velké výhody použití především díky malé velikosti, odolnosti a také v bezdrátové komunikaci. Dále díky své velikosti není zapotřebí větších kompromisů v geometrii nebo jiných parametrech betonu. Nevýhodou je vysoká cena MEMS senzorů, ale s předpokladem vývoje těchto technologií a vyššího uplatnění na trhu, lze očekávat postupné snižování cen [34].



### 4.3 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Tato část se věnuje vlastnímu experimentu pro stanovení vlhkosti v betonu. Cílem experimentu je zhodnotit spolehlivost měření zvolených metod stanovení vlhkosti ku metodě gravimetrické, jelikož ta je považována za metodu nepřesnější. Měření bylo prováděno na vlastně vytvořených betonových tělesech.

#### 4.3.1 Metodika experimentu

Experimentální část byla rozdělena na dvě etapy. První etapa experimentu spočívala ve výrobě zkušebních těles z betonu. V druhé etapě pak probíhalo samotné měření vlhkosti betonu.

V první etapě experimentu byl připraven beton, který následně sloužil pro účely měření vlhkosti. Jednalo se o standardní beton, bez jakýchkoliv upřesňujících požadavků. Výsledná konzistence čerstvé směsi činila 80 mm sednutí kužele. Pevnosti betonu se pohybovaly okolo 45 MPa, při použití portlandského cementu CEM I 42,5 R v dávce 340 kg/m<sup>3</sup>.

Z této směsi pak bylo vytvořeno 20 zkušebních těles, z nichž 16 těles tvořily kvádry o rozměrech 150×150×50 mm pro měření vlhkostních profilů. Zbývá 4 tělesa byla vyrobena v podobě kostek o rozměrech 150×150×150 mm pro stanovení pevnosti v tlaku. Další variantou byla tělesa s betonářská výztuží ve formě tyčové výztuže, která simulovala vyztužení prvku, a to za účelem zjištění, zda-li bude výskyt výztuže ovlivňovat výsledky měření vlhkosti různými metodami.

Po 24 hodinách byla tělesa pro stanovení vlhkostních profilů odformována a uložena v laboratorním prostředí. Pro zajištění simulace masivního betonu, a zároveň zabránění ztrátě vlhkosti, byla tělesa z boční a spodní strany izolována pomocí fólie. Ve vybraných vzorcích byl vytvořen 7 mm vývrt pro stanovení relativní vlhkosti pomocí vlhkostní sondy. Měřený povrch zůstal po celou dobu měření volný, a to pro možnost regulace vlhkosti vzorku, což mělo simulovat skutečné podmínky v praxi při volném vysychání. Tělesa vytvořena pro stanovení pevnosti v tlaku byla po celou dobu měření uložena ve vodním uložení.

V druhé fázi probíhalo měření vlhkosti na vyrobených betonových tělesech, kde byl měřen vývoj vlhkosti v čase, z čehož byl vytvořen výsledný vlhkostní profil. Měření bylo prováděno periodicky nejdříve po 2 a následně po 7 dnech. Konkrétně se měřilo ve stáří

vzorků 1, 3, 5, 7, 14, 21 a 28 dní. Vždy se na všech vzorcích nejprve stanovily nedestruktivní metody a následně byla provedena metoda destruktivní, v tomto případě gravimetrická. S postupem času byla některá tělesa vyřazována, a to z důvodu jejich mechanického porušení při odběru vzorku pro gravimetrickou metodu, kdy už tělesa nebyla schopna poskytovat totožnou plochu pro měření. Pro měření vlhkosti byly zvoleny dva kapacitní vlhkoměry, mikrovlnný vlhkoměr, vlhkostní sonda pro měření relativní vlhkosti a zařízení pro sušení materiálu.

Z naměřených dat byly porovnány přímo hmotnostní vlhkosti betonu, které přístroje generovaly na základě implementovaných kalibračních křivek. V dalším kroku byla vyhodnocena referenční data, což jsou bezrozměrná čísla nekorespondující s implementovanou kalibrační křivkou přístroje. Na základě těchto dat byly společně s výsledky gravimetrie vytvořeny konkrétní kalibrační křivky betonu. Dále jsou popsány jednotlivé metody měření.

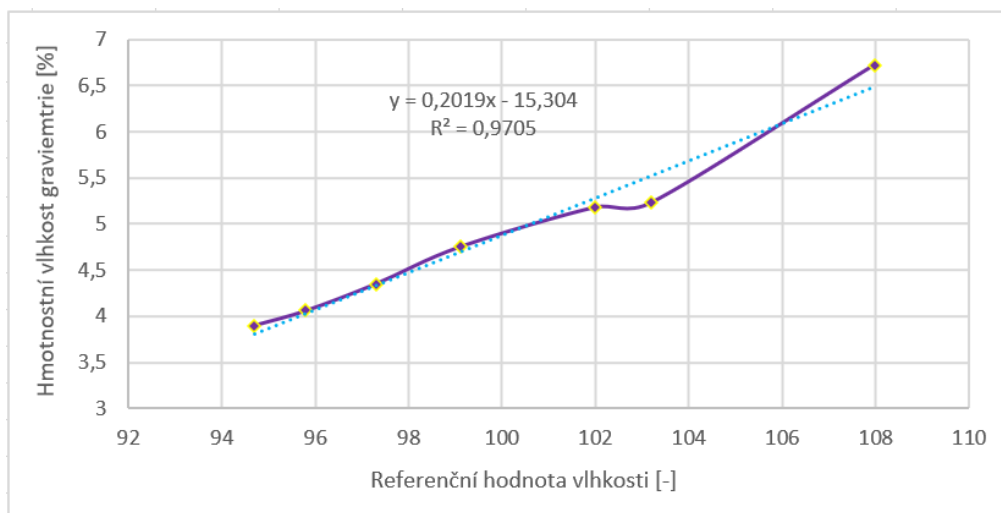
#### **4.3.2 Měření vlhkosti kapacitním vlhkoměrem Greisinger GMK 100**

Jedná se o přístroj pro nedestruktivní měření vlhkosti. Pracuje na principu změny dielektrické konstanty, která je u vody daleko vyšší než u ostatních materiálů. Jindy se označují také jako příložené vlhkoměry, a to podle způsobu jejich aplikace, jelikož se při měření přikládají k povrchu. Měřicí pole se nachází na zadní straně přístroje, kde jsou pole barevně odlišena podle hloubky měření. Přístroj dokáže měřit v hloubkách 10 a 25 mm.

Při experimentálním měření byl přístroj nastaven na měření hmotnostní vlhkosti v hloubce 25 mm. Dále se na displeji pomocí konfiguračních tlačítek nastavila kalibrace pro beton. Na každém ze zkoušených těles bylo v každý měřicí den provedeno 5 samostatných měření v různých místech, a to tím způsobem, že se přístroj zadní stranou umístil na povrch betonu. Následně se z displeje odečetla výsledná hodnota vlhkosti. Naměřená data byla zprůměrována a porovnána s hodnotou gravimetrické metody ve stejném stáří betonu. Spodní povrch kvádru ve směru hutnění sloužil jako měřicí plocha u všech vzorků, protože pro měření touto metodou je nezbytná rovná kontaktní plocha. I při samostatném měření bylo zjištěno, že přístroj je velice citlivý na rovnost povrchu. Jakákoliv nerovnost vyskytující se na povrchu může způsobit nežádoucí výchylku

výsledků. Z tohoto důvodu je u této metody nutné povrch důkladně očistit a vybírat co nejhladší plochy.

Referenční data sloužila pro tvorbu vlastních kalibrační křivek. Tato data byla porovnána s výsledky gravimetrické metody. Výsledkem byla křivka na obr. č. 22 s určitou spolehlivostí linearity gravimetrie ( $R^2$ ) a rovnice pro přepočet referenčních dat na hmotnostní vlhkost. Výsledky hmotnostních vlhkostí přístroje GMK 100 jsou porovnány ve společném grafu na obr. č. 25.

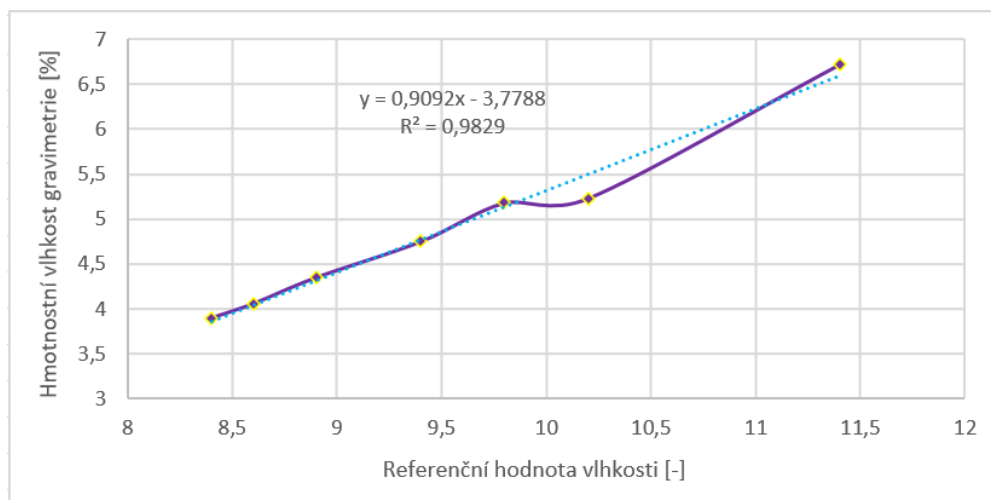


Obr. 22 Kalibrační křivka pro vlhkoměr Greisinger GMK 100

#### 4.3.3 Měření vlhkosti kapacitním vlhkoměrem Greisinger GMI 15

Stejně jako u předešlého přístroje se jedná opět o kapacitní vlhkoměr. Ovšem v tomto případě přístroj neměří žádné konkrétní hodnoty hmotnostní vlhkosti, nýbrž hodnoty referenční. Tyto hodnoty jsou ovšem pouze bezrozměrné číslo. Tudíž se pro použitelnost přístroje musí sestavit kalibrační křivka. Ta se sestaví tak, že se k příslušným referenčním hodnotám přiřadí odpovídající skutečné hodnoty zjištěné jinou metodou, která generuje přímo výsledné hodnoty vlhkosti (nejčastěji gravimetrická metoda).

Postup měření se stejně jako u předchozího kapacitního vlhkoměru prováděl tak, že se spodní měřicí pole přiložilo na hladkou plochu betonového kvádrů. Na každém zkušebním tělese bylo provedeno 5 záznamů referenční hodnoty. Tyto výsledky byly zprůměrovány pro každý měřicí den. Průměrné hodnoty pak byly porovnány s výsledky gravimetrické metody a byla sestavena výsledná kalibrační křivka zobrazená v grafu na obr. č. 23.



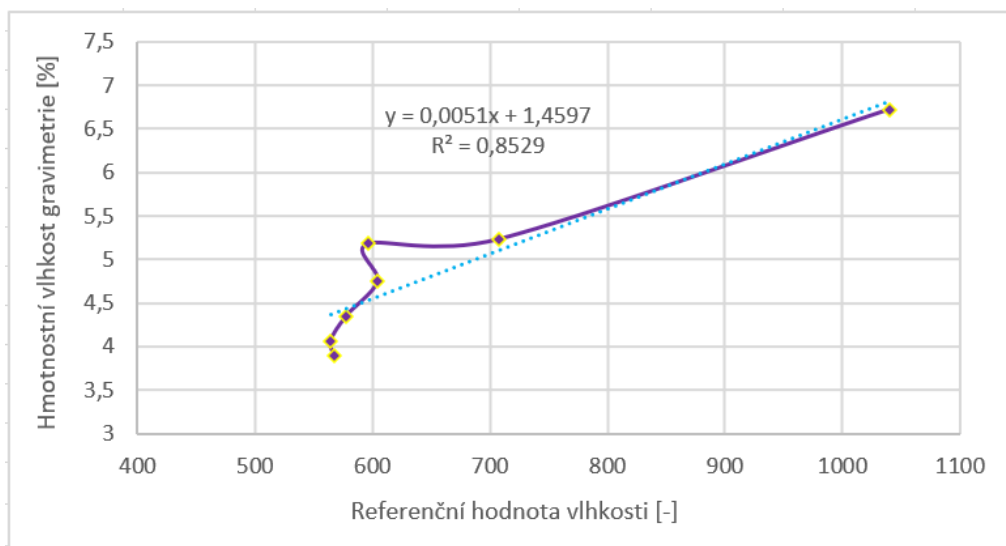
*Obr. 23 Kalibrační křivka pro vlhkoměr Greisinger GMI 15*

#### **4.3.4 Měření vlhkosti mikrovlnným vlhkoměrem MOIST 350**

Mikrovlnný vlhkoměr MOIST 350 pracuje na rozdílu emitovaných a přijatých elektromagnetických vln. Zařízení obsahuje mnoho kalibračních křivek pro spoustu stavebních materiálů včetně betonu, kde jsou v nabídce křivky podle pevnostních charakteristik betonu. Lze zvolit mezi C 20/25 a C 30/37, jenž byla nakonec zvolena.

Při měření byly zapisovány jak hodnoty referenční, tak hodnoty hmotnostní vlhkosti naměřené podle integrované kalibrační křivky betonu. Pro stanovení hodnot vlhkosti byla zvolena měřicí sonda s hloubkou měření až 70 mm. Postup měření je velmi jednoduchý, spočívá v prvotní instalaci senzoru a následným zvolením typu měření a kalibrační křivky měřeného materiálu. Po konfiguraci se sonda plochou částí přiloží k betonovému povrchu a zmáčkne se tlačítko umístěné na přístroji. Vlhkoměr okamžitě generuje výsledek, který se zobrazuje na displeji.

Naměřené referenční hodnoty byly vyhodnoceny v závislosti na výsledky gravimetrické metody. Kalibrační křivka je znázorněna na obr. č. 24. Naměřené hmotnostní vlhkost byly vyobrazeny spolu s ostatními metodami v grafu na obr. č. 25.



Obr. 24 Kalibrační křivka pro vlhkoměr MOIST 350

#### 4.3.5 Měření vlhkostní sondou Testo 635

Tento vlhkoměr měří vlhkost materiálu, a to za pomoci vlhkostních sond. Tyto vlhkostní sondy se nejčastěji používají u zkoušek s vývrty. Přístroj nepracuje s hmotnostní vlhkostí, nýbrž s vlhkostí relativní. Tudíž při zpracování výsledků je zapotřebí vytvořit sorpční izotermu v závislosti na hmotnostní vlhkost. Tato metoda se často používá u betonových podlah, kdy podle americké normy ASTM F 2170 obecně platí, že při naměření relativní vlhkosti 75–80 % lze předpokládat, že hmotnostní vlhkost není vyšší jak 5 %.

Před začátkem měření byly v betonových kvádrech vytvořeny vývrty o průměru 7 mm. Na začátku se do přístroje umístila vlhkostní sonda. Zařízení bylo následně zapnuto a hrot vlhkostní sondy se vložil do vytvořeného vývrtu. Po vyrovnání vlhkosti na displeji přístroje byla zapsána výsledná hodnota relativní vlhkosti uvnitř betonu. Z naměřených hodnot byla sestavena část sorpční izotermu zobrazená na obr. č. 27.

#### 4.3.6 Měření vlhkosti gravimetrickou metodou

Gravimetrická metoda je nejpresnější ze všech metod, a proto byla i v tomto experimentu použita především pro porovnání přesnosti ostatních prováděných metod. Tato metoda pracuje na principu rozdílu hmotností vysušeného a vlhkého vzorku, který se odebere ze zkoušeného vzorku. Vlhké vzorky se vysuší do konstantní hmotnosti v sušárně při teplotě 105 °C. Obvykle je tohoto stavu dosaženo po 72 hodinách. Výsledkem je vypočtená procentuální hmotnost vlhkosti. Hodnoty gravimetrické metody sloužili jako porovnávací

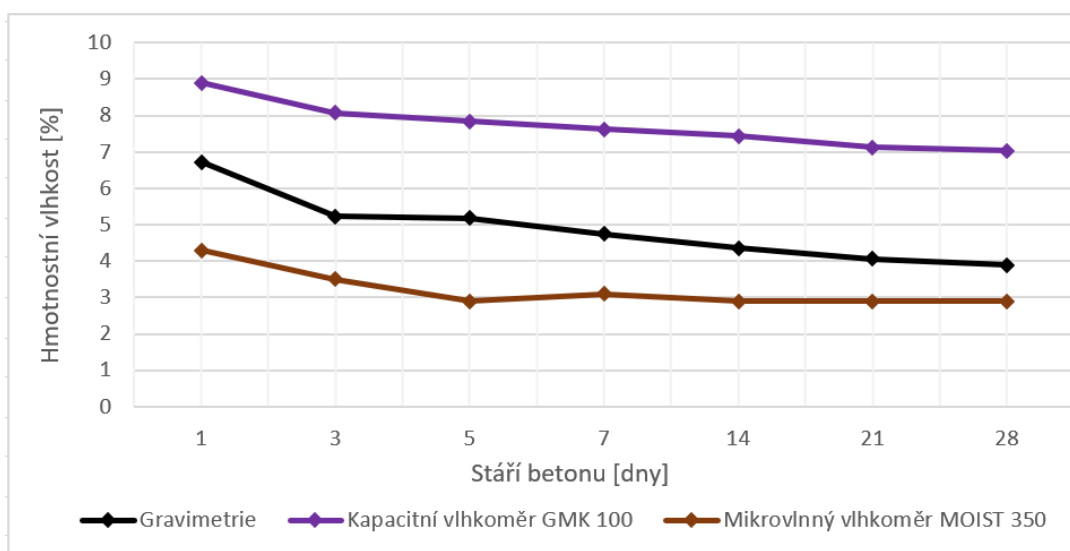
data pro všechny zbylé metody stanovení vlhkosti, jelikož výsledky této metody dosahují největší přesnosti.

#### 4.3.7 Vyhodnocení naměřených hodnot

Naměřená data kapacitní a mikrovlnnou metodou byla vyhodnocena dvojím způsobem. Nejprve porovnáním výsledků gravimetrické metody ku naměřeným vlhkostem z kalibračních křivek betonu, které jsou implementovány v paměti vlhkoměrů. V tomto případě byly výstupem přístroje finální hodnoty vlhkosti betonu uváděné v procentuálních hmotnostech. Takto naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce č.1. Grafický průběh hmotnostních vlhkostí naměřených kapacitním, mikrovlnným vlhkoměrem a gravimetrickou metodou je pak vyobrazený na obr. č. 25.

Tabulka 1: Hodnoty hmotnostní vlhkosti naměřené vybranými metodami

Den	Vlhkoměr		
	Gravimetrie [%]	GMK 100 [%]	MOIST 350 [%]
1	6,72	8,9	4,30
3	5,23	8,08	3,50
5	5,18	7,85	2,90
7	4,75	7,62	3,10
14	4,35	7,44	2,90
21	4,06	7,12	2,90
28	3,9	7,03	2,90



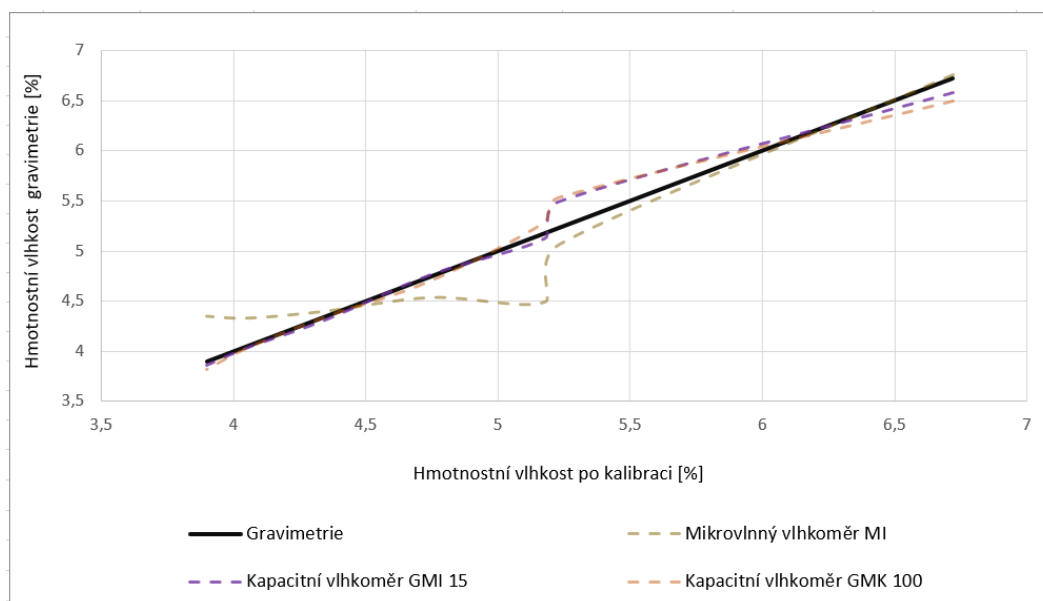
Obr. 25 Vývoj hmotnostní vlhkosti v čase

V druhé části pak byly vyhodnoceny referenční hodnoty vlhkoměrů, které byly porovnány s výsledky gravimetrické metody. Z tohoto porovnání vznikly konkrétní kalibrační křivky, které zhodnocují spolehlivost měření vlhkoměrů ku skutečnému stavu. Spolehlivost výsledků zde zobrazuje koeficient spolehlivosti  $R^2$  uvedený v tabulce č.2. Gravimetrická metoda zde dosahuje hodnoty koeficientu spolehlivosti 100 %, jelikož všechny metody stanovení vlhkosti se srovnávají s výsledky gravimetrie, která je nepřesnější ze všech metod.

Tabulka 2: Hodnoty koeficientu spolehlivosti vybraných metody

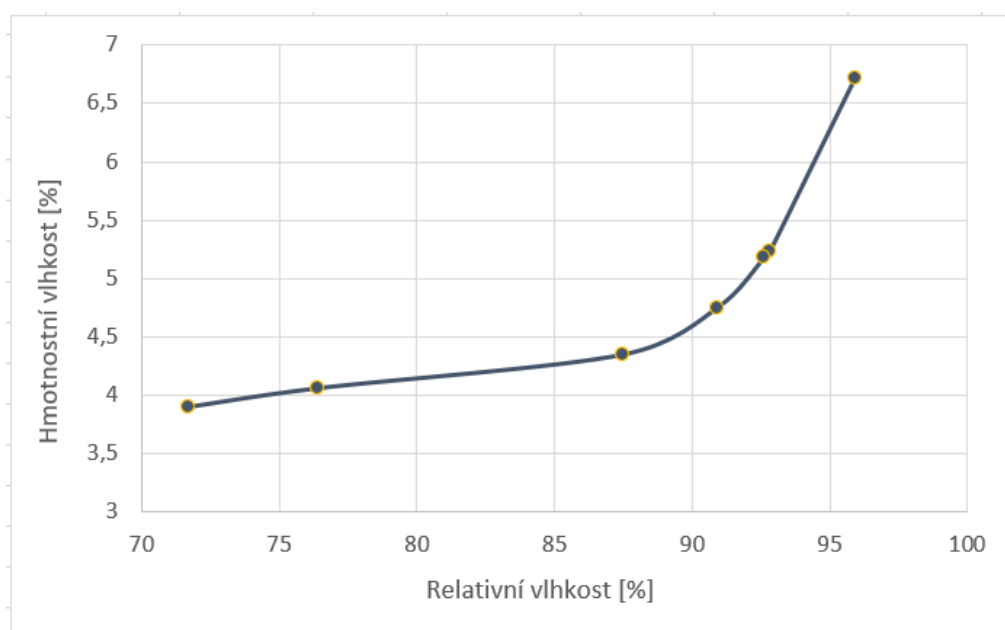
Vlhkoměr	Gravimetrie	GMK 100	GMI 15	MOIST 350
$R^2$	1	0,9705	0,9829	0,8529

Všechny vytvořené kalibrační křivky byly vyobrazeny na obr. č. 26, kde lze vidět, že kapacitní vlhkoměry dosahovaly velké podobnosti linearitu s gravimetrickou metodou. Naopak mikrovlnný vlhkoměr vykazoval větší odchylky od tvaru přímky gravimetrické metody.



Obr. 26 Porovnání kalibračních křivek vybraných vlhkoměrů

V poslední části byly měřeny hodnoty relativních vlhkostí betonu. Ty se, stejně jako předešlé metody, porovnávaly s hodnotami gravimetrické metody. Výsledkem je část sorpční izotermy znázorněna na obr. č. 27., která znázorňuje průběh vývoje relativní vlhkosti v závislosti na hmotnostní vlhkosti.



Obr. 27 Závislost relativní vlhkosti na vlhkosti hmotnostní (sorpční izoterma)



Hodnoty relativních vlhkostí, a s nimi spojené tvorby sorpčních izoterm, jsou často stanovovány u měření vlhkosti betonových podlah a potěrů, kde se jedná o orientační stanovení, přičemž se hodnoty mezi 75–80 % relativní vlhkosti obecně považují za ekvivalent 5 % hmotnostní vlhkosti.

#### **4.4 DISKUZE VÝSLEDKŮ**

Finální vlhkostní profily měření vlhkosti přinesly odlišné výsledky pro jednotlivé metody stanovení vlhkosti, což potvrzují i odborné studie [23]. Vybrané přístroje pro měření vlhkosti disponují buď přímým výstupem hodnoty vlhkosti vyhodnoceným pomocí interní kalibrační křivky přístroje a nebo výstupem referenčních hodnot pro sestavení kalibračních křivek. Zpravidla poskytují obě možnosti.

V případě betonu se nejčastěji používají kapacitní vlhkoměry, jelikož jsou jednoduché a ve většině času poskytují relevantní výsledky, toto tvrzení potvrzují také některé studie [22].

Mezi další často používané metody měření vlhkosti patří metody mikrovlnné, které jsou rychlé a jednoduché na manipulaci. Často také nabízí možnost sestavení vlhkostních map, avšak přesnost výsledků může být často ovlivněna citlivostí přístroje. V praxi se také používají i některé orientační metody, jako zkouška s vývrty, kalcium-chloridová metoda nebo fóliová metoda. Tyto metody se často využívají u betonových podlah, kde výstupem měření bývají relativní vlhkosti, které se orientačně převádí na vlhkosti hmotnostní. Mezi méně časté metody se pak řadí například metoda termografická, jejímž výstupem je pouze viditelné spektrum zvýšeného výskytu vlhkosti, tudíž nám neposkytuje žádná číselná data. Méně pozornosti dostává i metoda odporová, jelikož zde se měří pomocí hrotů, které se do betonu vpichují nesnadno a měření by tím mohlo být zásadně ovlivněno. Nevhodnost této metody spočívá také v tom, že zařízení dokáže měřit vlhkost jen několik milimetrů pod povrchem betonu. Mezi nejpřesnější a často také srovnávací metody se řadí metoda gravimetrická a metoda karbidová. Tyto metody poskytují velmi konzistentní a přesné výsledky, ovšem pro jejich použití je zapotřebí narušit konstrukci, což není vždy možné ani žádané.

V oblasti stanovení vlhkosti v betonu neustále probíhá výzkum za účelem co největšího zpřesnění výsledku metod, které pro účely měření nevyžadují narušení analyzované konstrukce [30][34].

V první fázi experimentu byla přímo měřena hmotnostní vlhkost betonu neboli použité vlhkoměry pro toto měření v sobě měly již implementovanou kalibrační křivku pro beton. Z vybraných vlhkoměrů touto funkcí disponoval kapacitní vlhkoměr GMK 100 a mikrovlnný vlhkoměr MOIST 350. Výsledky dosažené těmito vlhkoměry nevedou k úplné shodě s výsledky gravimetrie. Jak je zobrazeno v grafu na obr. č. 25, kapacitní vlhkoměr vykazuje podobnou klesající tendenci jako gravimetrická metoda. Avšak konečné výsledky hmotnostní vlhkosti měřené kapacitním vlhkoměrem (GMK 100) se po celou dobu měření držely v hodnotách o 2–3 % vyšších než přesná gravimetrická metoda, jenž je považována za metodou nejpřesnější.

Na druhé straně u mikrovlnného vlhkoměru MOIST 350 po počátečním klesání došlo k minimálnímu navýšení po sedmi dnech a následně k ustálení hodnoty vlhkosti. V tomto období již měření nevykazovalo žádné výrazné rozdíly ve vlhkostech, přestože výsledky gravimetrie vykazovaly neustále klesající tendenci. Avšak i u této metody byl očekáván kontinuální pokles hodnot vlhkosti, jako tomu bylo u předešlé metody, ale vlhkostní profil nevykazoval žádné další změny. Tento jev mohl být způsoben sníženou citlivostí metody při nižších hodnotách vlhkostí, jelikož od počátku měření vykazoval vlhkoměr nejnižší hodnoty hmotnostních vlhkostí ze všech metod, přestože je v přístroji implementovaná křivka shodných pevnostních charakteristik betonu.

Naměřená data mikrovlnným vlhkoměrem se rozcházela s hodnotami gravimetrie po celou dobu měření v intervalu od 3,3 % v první měřící den po 1 % v poslední den měření. Konkrétně se hmotnostní vlhkost po sedmém dni měření ustálila na konstantní průměrnou hodnotu 2,9 %, a tudíž se postupně přibližovaly klesajícím výsledkům gravimetrické metody. S touto tendencí by se tedy výsledky mohly shodovat v delším časovém úseku, než bylo prováděno měření, ale pouze za předpokladu, že tělesa budou neustále uložena v neměněném prostředí, kde nebude docházet k velkým výkyvům podmínek prostředí, především z pohledu relativní vlhkosti vzduchu. Rozdíl výsledků je poměrně velký, pravděpodobně by mohl být způsoben tím, že integrovaná kalibrační křivka betonu je do značné míry brána jako univerzální a nemusí se vždy shodovat s parametry měřeného betonu. A to z důvodu, že v betonu může docházet k velkým rozdílům, což se týká především složení a struktury, která může zásadně ovlivnit transport vlhkosti v betonu. V druhé fázi bylo prováděno měření referenčních hodnot vlhkosti. Tato naměřená data nepracují s žádnou již implementovanou kalibrační křivkou, tudíž výsledkem je tzv.

vlhkostní index, alespoň takto někteří výrobci veličinu označují, změřený přístrojem na základě jeho metodiky měření. Referenční data vystupovala tedy ve formě bezrozměrných čísel, ze kterých byly vytvořeny konkrétní kalibrační křivky pro analyzovaný beton. Tyto referenční hodnoty byly stanoveny u obou kapacitních vlhkoměrů a mikrovlnného vlhkoměru. Výsledné křivky byly vyobrazeny v grafu na obr. č. 26, ve kterém lze vidět podobnosti kalibračních křivek ku křivce gravimetrie, která je zde metodou srovnávací. Oba kapacitní vlhkoměry dosahovali velké podobnosti linearity odpovídající 97–98 % koeficientu spolehlivosti. Lze tedy předpokládat, že při vytvoření vlastní kalibrační křivky můžeme u těchto přístrojů očekávat velkou shodnost výsledků se skutečnými hodnotami. U mikrovlnného vlhkoměru už podobnost křivce gravimetrie nebyla tak vysoká jako u předešlých kapacitních vlhkoměrů. Koeficient spolehlivosti zde vycházel přibližně 85 %, ale i tak šel celkem přesně využít.

V poslední části byly měřeny hodnoty relativní vlhkosti za pomoci vlhkostní sondy Testo 635. Výsledkem byla vrchní část sorpční izotermy mezi relativní vlhkostí 70–96 %, která je vyobrazena v grafu na obr. č. 27. Výsledný tvar izotermy má podobnost s horní částí „esovitého“ tvaru sorpčních izoterm betonu, které se využívají pro znázornění průběhu vývoje relativní vlhkosti v závislosti na vlhkosti hmotnostní. Tato metoda se často používá v oblastech betonových podlah jako orientační stanovení, kdy obecně platí, že relativní vlhkost okolo 80 % zhruba odpovídá 5 % hmotnostní vlhkosti [43].

Ve výpočtu se také zohlednil vliv výztuže na výsledné hodnoty jednotlivých vlhkoměrů. Jediný přístroj, který vykazoval výkyv hodnot u vyztužených těles, byl mikrovlnný vlhkoměr MOIST 350, který vykazoval nepatrně nižší hodnoty u vyztužených prvků. Ostatní vlhkoměry nevykazovaly žádné známky rozdílných hodnot mezi vyztuženými a nevyztuženými zkušebními tělesy.

## 5 ZÁVĚR

Tato práce se zabývala problematikou stanovení vlhkosti v betonu především z hlediska popisu metodiky stanovení a její relevance. V teoretické části se nejprve nachází stručné seznámení se základními poznatky o betonu, kdy jsou popsány vlastnosti tohoto materiálu spolu s jeho základními složkami. Dále je řešena problematika ohledně vzniku a vlastností pórovité struktury betonu, jejího vlivu na chování vlhkosti, a nakonec výsledné vlastnosti betonu z hlediska trvanlivosti, jelikož výskyt a transport vody má zásadní vliv na působení agresivních vlivů. Nakonec je popisována vlhkost v betonu, a to především z pohledu jejího transportu strukturou a chováním v čase.

Praktická část se nejprve zabývá popisem vybraných metod stanovení vlhkosti v betonu. Metody jsou dále popsány podle principu měření, postupu stanovení, včetně zhodnocení a relevancí použití. V praktické části se také nachází experimentální část, kde byly porovnávány výsledky vybraných nedestruktivních metod stanovení vlhkosti ku metodě gravimetrické.

Měření bylo prováděno v intervalu 28 dnů od výroby, z čehož byl následně vyhodnocen vývoj vlhkosti v čase. Při experimentu bylo měřeno vybranými metodami stanovení vlhkosti, jako je metoda kapacitní, mikrovlnná, gravimetrická nebo metoda s vrtanou sondou, které se v praxi běžně používají.

Výsledky měření hmotnostních vlhkostí pomocí integrovaných kalibračních křivek betonu, se neshodovaly s hodnotami stanovenými gravimetrickou metodou. Všechny metody vykazovaly klesající tendenci v celém průběhu měření, až na metodu mikrovlnnou, která se po sedmém dni měření ustálila do konstantní hodnoty. V případě mikrovlnného vlhkoměru se vlhkostní profil nacházel níže než samostatná gravimetrie. U kapacitního vlhkoměru tomu bylo přesně naopak a výsledky vykazovaly hodnoty vyšší než gravimetrie i přesto, že podle očekávání docházelo k poklesu hodnot v čase.

V 28 den byly průměrné hodnoty hmotnostní vlhkosti následující: 7,03 % pro měření kapacitním vlhkoměrem, 2,9 % pro měření mikrovlnným vlhkoměrem a nakonec 3,9 % pro měření gravimetrickou metodou. Odlišné výsledky byly nejspíše způsobeny tím, že implementované kalibrační křivky betonu jsou do jisté míry univerzální a nemusí se vždy shodovat s parametry měřeného betonu, jako jsou rozdíly ve struktuře, složení nebo druhu betonu. Odlišné výsledky mohli být také způsobeny citlivostí přístrojů. Například u kapacitních přístrojů dochází k vysokým výkyvům naměřených hodnot při nedostatečně

rovných plochách nebo při nadměrném přitlačení měřicí plochy k povrchu. To může být zásadní pro správné dosažení hodnot vlhkostí.

Mnohem přesnějším stanovením vlhkosti je pomocí referenčních hodnot. Tato naměřená data se neváží na žádnou z implementovaných kalibračních křivek přístroje, a tudíž je výstupní hodnotou pouze bezrozměrné číslo reprezentující určitý vlhkostní stav. Proto bylo zapotřebí výsledná referenční data porovnat s výsledky gravimetrie a vytvořit kalibrační křivky, které spolehlivě převedly základní referenční data na výsledné hmotnostní vlhkosti. Toto se potvrdilo u všech stanovovaných metod. Kalibrační křivky vykazovaly různou spolehlivost hodnot vůči gravimetrické metodě, která je nezbytnou podmínkou pro provádění tohoto stanovení. Výsledky kapacitních vlhkoměrů dosahovaly velké přesnosti odpovídající 97–98 % koeficientu spolehlivosti, naopak přesnosti výsledků mikrovlnného vlhkoměru dosahovaly přibližně 85 % koeficientu spolehlivosti. Ale dle očekávání, tento postup dokázal spolehlivě vyřešit rozdíly v jednotlivých metodách měření vlhkosti. Nelze tedy jako závěr uvažovat, že zvolené metody nejsou vhodné. Problém je v nastavení kalibrace výrobcem.

V poslední části měření se stanovovala relativní vlhkost betonu pomocí vlhkostní sondy umístěné ve vývrtech vybraných zkušebních těles. Z těchto naměřených dat byla vyhodnocena část sorpční izotermy, která slouží pro zobrazení vývoje a závislosti mezi relativní a hmotnostní vlhkostí. Tato metodika je často používána u betonových podlah a tenkostěnných prvků jako orientační stanovení vlhkosti, kdy obecně platí, že relativní vlhkost okolo 80 % zhruba odpovídá 5 % hmotnostní vlhkosti.

Jedním z důležitých cílů, které byly v práci prováděny, bylo i sledování vlivu výztuže betonu na použité metody stanovení vlhkosti. V praxi je většina betonových konstrukcí s použitím klasické nebo rozptýlené výztuže. Z výsledků bylo zjištěno, že u mikrovlnného vlhkoměru docházelo k nepatrnému poklesu hodnot při měření těles s výztuží oproti tělesům bez výztuže. Je tedy nutné věnovat pozornost metodám, u kterých by při měření mohla výztuž negativně ovlivnit výsledky. Na druhou stranu vykázané odchylky výsledku nebyly až tak vysoké, v průměru se jedno o dílčí rozdíly v rozmezí 0,5 %.

Nakonec je zapotřebí podotknout, že pro dosažení adekvátních a dostatečně přesných výsledků vlhkosti v betonu je stále nutné uvažovat gravimetrickou metodu, která vyžaduje zásah do konstrukce a je časově náročná. A to především proto, že většina dostupných a často používaných nedestruktivních metod nedosahuje na tolik přesných

výsledků, aby mohla gravimetrii nahradit. Alespoň tak to vyplývá z naměřených výsledků této práce u vybraných metod. Jak bylo zjištěno na základě teoretických i praktických poznatků z měření vlhkosti a následných sestavování vlhkostních profilů, mohou nastávat značné rozdíly v měření vlhkosti, které souvisí především s konkrétními metodami. Odchylky výsledků mohou být velmi vysoké a vyhodnocení takovýchto dat může mít zcela odlišné závěry při použití stejných metod. I proto je vždy nutné zvážit použitelnost konkrétní metody, případně je vhodné sestavit vlastní kalibrační křivky. Záleží ovšem i na přesnosti měření, kterou očekáváme či požadujeme.

Tato problematika je stále aktuální a je žádoucí, aby byla tomuto tématu věnována pozornost. Do budoucna se objevují náznaky nových metod, jenž jsou v práci také zmíněny, které pracují na bázi zpracování zvukového signálu a strojového učení. Výsledky se výrazně přibližují hodnotám gravimetrie, ale zatím jsou prováděny pouze na experimentální úrovni případně jsou pro praxi velmi náročné.

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vztah mezi permeabilitou a pórovitou strukturou [42] .....	18
Obr. 2 Povrch betonu porušený mrazem a rozmrazovacími prostředky [31] .....	19
Obr. 3 Mechanismus adsorpce [41] .....	22
Obr. 4 Tvar Freundlichovy izotermy [5] .....	24
Obr. 5 Tvar Langmuirovy izotermy [5] .....	25
Obr. 6 Tvar izotermy BET při $Q_{ads} > Q_{kon}$ neboli ( $C > 1$ ) [5] .....	26
Obr. 7 Tvar izotermy BET při $Q_{ads} < Q_{kon}$ neboli ( $C < 1$ ) [5] .....	27
Obr. 8 Hysterze sorpční izotermy [36] .....	29
Obr. 9 Vysychání stěny v průběhu času [36] .....	30
Obr. 10 Sada pro metodu CM [38] .....	33
Obr. 11 Kapacitní vlhkoměr Greisinger GMK 100 [39] .....	35
Obr. 12 Odporový vlhkoměr Greisinger GMR 110 [40] .....	36
Obr. 13 Radiometrická souprava Troxler 3411 [24] .....	38
Obr. 14 Mikrovlnná souprava MOIST 350 [25] .....	39
Obr. 15 Termografický snímek podlahy [21] .....	40
Obr. 16 Měření poklepů kladívkem [30] .....	43
Obr. 17 MEMS senzory [34] .....	44
Obr. 18 Nasbírání data z MEMS senzorů v průběhu prvních 24 hodin [34] .....	45
Obr. 19 Vývoj výstupního napětí v průběhu hydratace betonu [34] .....	45
Obr. 20 Závislost relativní vlhkosti na výstupním napětí MEMS senzorů [34] .....	46
Obr. 21 Závislost teploty na výstupním napětí MEMS senzorů [34] .....	47
Obr. 22 Kalibrační křivka pro vlhkoměr Greisinger GMK 100 .....	50
Obr. 23 Kalibrační křivka pro vlhkoměr Greisinger GMI 15 .....	51
Obr. 24 Kalibrační křivka pro vlhkoměr MOIST 350 .....	52
Obr. 25 Vývoj hmotnostní vlhkosti v čase .....	54
Obr. 26 Porovnání kalibračních křivek vybraných vlhkoměrů .....	55
Obr. 27 Závislost relativní vlhkosti na vlhkosti hmotnostní (sorpční izoterma) .....	55

## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SVOBODA, Luboš a kolektiv. *Stavební hmoty*. 3. dopl. vyd. Praha, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [2] HELA, Rudolf. *Technologie betonu. Modul M01: BJ 04 Technologie betonu I*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005, 110 s.: il.
- [3] ČESKOMORAVSKÝ CEMENT, Heidelberg Cement Group. *Příručka technologa Beton* [online]. [cit. 26.2.2021]. Dostupný na WWW:  
<https://www.transportbeton.cz/tisk-a-media/dokumenty-ke-stazeni.html>
- [4] ŠŤASTNÍK, Stanislav. *Izolační materiály. Modul M01, [BJ07-MO1]: Vlhkost ve stavebních materiálech*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005, 120 s.: il.
- [5] BARTOVSKÁ, Lidmila, ŠIŠKOVÁ Marie: *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav* [online]. Version 1.0. Praha: VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2021-02-03]. P. 071-074. Available from www: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-80-7080-579-X/pages-img/071.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-579-X/pages-img/071.html)
- [6] DROCHYTKA, Rostislav; MATULOVÁ, Pavla. *Lehké stavební látky MODUL M01*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2006
- [7] BALÍK, Michael. *Odvhlčování staveb*. Praha: Grada, 2008, ISBN 978-80-247-2693-9.
- [8] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: ČKAIT, 2009, ISBN 978-80-87093-75-7.
- [9] ADÁMEK, Jiří; JURÁNKOVÁ, Vlasta; MICHALKO, Ondřej. *Sledování kvality těsnících technologií stanovením součinitele propustnosti povrchu sanovaných betonů pro vodu a vzduch* [online]. [cit. 22.2.2021]. Dostupný na WWW:  
<http://fast10.vsb.cz/science/konf-02-2001/pics/34.pdf>
- [10] ÄIT-MOKHTAR, Abdelkarim; MILLET, Olivier. *Structural Design and Degradation Mechanism in Coastal Enviroments*. Londýn: ISTE Ltd., 2015, ISBN 978-1-84821-732-4.
- [11] KOFALA, Jiří. *Vybrané kapitoly z fyzikální chemie* [online]. [cit. 8.2.2021]. Dostupný na WWW:  
[https://ufch.vscht.cz/files/uzel/0013874/vybrane\\_kapitoly\\_fch.pdf?redirected](https://ufch.vscht.cz/files/uzel/0013874/vybrane_kapitoly_fch.pdf?redirected)
- [12] BAŽANT, Zdeněk P.; JIRÁSEK, Milan. *Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures*. Dordrecht: Springer, 2018, ISBN 978-94-024-1138-6.



- [13] CLAISSE, Peter A. *Transport Properties of Concrete*. Cambridge: Elsevier Ltd., 2014, ISBN 978-1-78242-306-5.
- [14] ČERNÝ, Robert; ROVNANÍKOVÁ, Pavla. *Transport Processes in Concrete*. Abingdon: Spon Press, 2002, ISBN 978-0-415-24264-6.
- [15] HUBERTO VÁ, Michala. *TRVANLIVOST LEHKÉHO KONSTRUKČNÍHO BETONU* [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupný na WWW: [https://www.betontks.cz/sites/default/files/BETON\\_TKS\\_2013-06.pdf](https://www.betontks.cz/sites/default/files/BETON_TKS_2013-06.pdf)
- [16] REITERMAN, Pavel; KADLECOVÁ, Zlata; KOLÁŘ, Karel, KEPPERT Martin, ADÁMEK Jiří, HOLČAPEK Ondřej. *Zhodnocení trvanlivosti při hodnocení kvality povrchové vrstvy betonu* [online]. 03/2012 [cit. 18.3.2021]. Dostupný na WWW: [https://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-3-62\\_1.pdf](https://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-3-62_1.pdf)
- [17] DOHNÁLEK, Jiří; HELA, Rudolf; DOHNÁLEK, Petr; KOLÍSKO, Jiří; HROMÁDKO, Jan. *Zkoušení mrazuvzdornosti betonu* [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupný na WWW: [https://www.betontks.cz/sites/default/files/2008-3-54\\_0.pdf](https://www.betontks.cz/sites/default/files/2008-3-54_0.pdf)
- [18] DOHNÁLEK, Jiří. *VLIV MRAZUVZDORNOSTI BETONU NA JEHO POVRCHOVÉ ÚPRAVY* [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupný na WWW: [https://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-3-44\\_0.pdf](https://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-3-44_0.pdf)
- [19] DOHNÁLEK, Jiří. *Bílá vana – větší jistota a menší náklady* [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupný na WWW: [https://www.betontks.cz/sites/default/files/2004-2-26\\_0.pdf](https://www.betontks.cz/sites/default/files/2004-2-26_0.pdf)
- [20] URBAN, Jaroslav. *Vliv hutnění a úpravy povrchu betonu na odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám CHRL* [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupný na WWW: [http://www.klok.cvut.cz/wp-content/uploads/2016/02/Diserta%C4%8Dn%C3%AD-pr%C3%A1ce\\_Ing.-Jaroslav-Urban-compressed1.pdf](http://www.klok.cvut.cz/wp-content/uploads/2016/02/Diserta%C4%8Dn%C3%AD-pr%C3%A1ce_Ing.-Jaroslav-Urban-compressed1.pdf)
- [21] POCHAMNOVÁ, Petra; MISAR, Ivan. *Kontrolní metody pro stanovení vlhkosti podkladních vrstev podlah* [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupný na WWW: <https://stavba.tzb-info.cz/podlahy/8050-kontrolni-metody-pro-stanoveni-vlhkosti-podkladnich-vrstev-podlah>
- [22] HORSKÝ, Jan; ŠRUBAŘOVÁ, Petra. *Měření vlhkosti betonu na mostovkách* [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupný na WWW: <https://www.izolace.cz/clanky/mereni-vlhkosti-betonu-na-mostovkach/>

- [23] HOBST, Leonard; VODOVÁ, Lucie. *SROVNÁVACÍ MĚŘENÍ VLHKOSTI STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ* [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupný na WWW: [https://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-1-66\\_0.pdf](https://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-1-66_0.pdf)
- [24] ANTON, Ondřej; BLAŽKOVÁ, Vendula; HOBST, Leonard. *MĚŘENÍ VLHKOSTI V PRAXI SOUDNÍHO INŽENÝRA* [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupný na WWW: <http://www.soudniinzenyrstvi.cz/archiv/docs/si-2005-03-175-178.pdf>
- [25] TESTO s.r.o. *Mikrovlnné vlhkoměry MOIST – nedestruktivní a spolehlivé měření vlhkosti stavebních materiálů* [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupný na WWW: <https://stavba.tzb-info.cz/vlhkost-a-kondenzace-v-konstrukcich/12289-mikrovlnné-vlhkomery-moist-nedestruktivní-a-spolehlivé-měření-vlhkosti-stavebních-materiálů>
- [26] H Kääriäinen, M Rudolph, D Schaurich, K Tulla, H Wiggenhauser,. *Moisture measurements in building materials with microwaves*: NDT & E International, Volume 34, Issue 6, [online]. 2001 [cit. 5.4.2021]. Dostupný na WWW: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869501000056> ISSN 0963-8695.
- [27] ADÁMEK, Jiří; CIKRLE, Petr; HOBST, Leonard; SCHMID, Pavel. *Diagnostika stavebních konstrukcí*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005,
- [28] DEROME, Dominique; TEASDALE-ST-HILAIRE, Anik; FAZIO, Paul. *Methods for the Assessment of Moisture Content of Envelope Assemblies* [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupný na WWW: [https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/2001%20B8%20papers/041\\_Derome.pdf](https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/2001%20B8%20papers/041_Derome.pdf)
- [29] HORKÝ, Ondřej; ZACH, Jiří. *Monitorování vlhkostního obsahu ve zdivu pomocí infračervené termografie* [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupný na WWW: <https://www.tzb-info.cz/4501-monitorovani-vlhkostniho-obsahu-ve-zdivu-pomoci-infracervene-termografie>
- [30] ZHENG, Liqiong; CHENG, Hao; HUO, Linsheng; GANGBING, Song. *Monitor concrete moisture level using percussion and machine learning* [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupný na WWW: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181932519X>

- [31] COUFAL, Robert. *Odolnost betonu v prostředí s mrazovými cykly* [online]. [cit. 14.5.2021]. Dostupný na WWW: [http://www.tbh-metrostav.cz/fileadmin/user\\_upload/napsali\\_o\\_nas/clanky\\_ke\\_stazeni/032\\_037\\_MAT04.pdf](http://www.tbh-metrostav.cz/fileadmin/user_upload/napsali_o_nas/clanky_ke_stazeni/032_037_MAT04.pdf)
- [32] ČSN EN 12390-8 (73 1302) – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou
- [33] ČSN EN 731326 – Stanovení odolnosti povrchu cementových betonů proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek
- [34] QUINCOT, Gonzalo; AZENHA, Miguel; BARROS, Joaquim; FARIA Rui. *State of the art – Methods to measure moisture in concrete* [online]. [cit. 17.5.2021]. Dostupný na WWW: [https://paginas.fe.up.pt/~selco/wpcontent/uploads/2014/02/Relatorio\\_1.pdf?fbclid=IwAR2Sut-v3I6Z7iHXNo6qwj0yEu5Kk\\_46dmJPnTSPsUgfv\\_ok2kn-M4ToO8](https://paginas.fe.up.pt/~selco/wpcontent/uploads/2014/02/Relatorio_1.pdf?fbclid=IwAR2Sut-v3I6Z7iHXNo6qwj0yEu5Kk_46dmJPnTSPsUgfv_ok2kn-M4ToO8)
- [35] NORRIS, Ashley; SAAFI, Mohamed; ROMINE, Peter. *Temperature and moisture monitoring in concrete structures using embedded nanotechnology/microelectromechanical systems (MEMS) sensors* [online]. [cit. 17.5.2021]. Dostupný na WWW: [https://www.researchgate.net/publication/229354447\\_Temperature\\_and\\_moisture\\_monitoring\\_in\\_concrete\\_structures\\_using\\_embedded\\_nanotechnologymicroelectromechanical\\_systems\\_MEMS\\_sensors](https://www.researchgate.net/publication/229354447_Temperature_and_moisture_monitoring_in_concrete_structures_using_embedded_nanotechnologymicroelectromechanical_systems_MEMS_sensors)
- [36] VINKLER, Marek; VÍTEK, Jan. *Vysychání a smršťování betonu* [online]. [cit. 19.5.2021]. Dostupný na WWW: [https://www.betontks.cz/sites/default/files/2016-2-40\\_0.pdf](https://www.betontks.cz/sites/default/files/2016-2-40_0.pdf)
- [37] VINKLER, Marek. *Voda v betonu* [online]. [cit. 26.5.2021]. Dostupný na WWW: <https://www.betontks.cz/sites/default/files/2018-2-49.pdf>
- [38] <https://www.aevysousece.cz/p/180/vlhkomer-gann-hydromat-cm-b-pro>
- [39] <https://greisinger.cz/GHM-GREISINGER-GMK-100-Kapacitni-meric-vlhkosti-dreva-a-stavebnich-materialu>
- [40] <https://www.conrad.cz/p/greisinger-gmr-110-meric-vlhkosti-materialu-mereni-vlhkosti-stavebnich-materialu-0-do-100-vol-mereni-vlhkosti-dreva-0-649944>
- [41] WANG, Jianlong; GUO, Xuan. Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method [online]. [cit. 26.5.2021]. Dostupný na WWW: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653520314727>

- [42] KŘENEK, Daniel *Vodonepropustné betonové konstrukce a předpisy pro jejich navrhování a provádění*. Brno, 2016. 70 s., 76 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
- [43] <https://www.pecora.com/wp-content/uploads/2015/11/pec-71-determining-moisture-content-of-concrete-through-field-testing-1.30.15-GWM.pdf>
- [44] HARAŽÍM, Miroslav. *Vlhkoměry pro měření vlhkosti betonu* [online]. [cit. 27.5.2021]. Dostupný na WWW: [https://www.betontks.cz/sites/default/files/2011-2-32\\_0.pdf](https://www.betontks.cz/sites/default/files/2011-2-32_0.pdf)

## **8 SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1: Hodnoty hmotnostní vlhkosti naměřené vybranými metodami .....	53
Tabulka 2: Hodnoty koeficientu spolehlivosti vybraných metody .....	54